



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Bauru



**ESTUDO EXPERIMENTAL DA REMOÇÃO, POR JATO DE AR
COMPRIMIDO, DE DETRITOS NA SUPERFÍCIE DE CORTE DE REBOLO
DIAMANTADO DURANTE A RETIFICAÇÃO DA ALUMINA REFRIGERADA
PELA TÉCNICA MQL**

JOSÉ FERNANDES DA SILVA NETO

**Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - *Campus* de Bauru,
para Obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica**

Bauru

2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Bauru



**ESTUDO EXPERIMENTAL DA REMOÇÃO, POR JATO DE AR
COMPRIMIDO, DE DETRITOS NA SUPERFÍCIE DE CORTE DE REBOLO
DIAMANTADO DURANTE A RETIFICAÇÃO DA ALUMINA REFRIGERADA
PELA TÉCNICA MQL**

JOSÉ FERNANDES DA SILVA NETO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
da UNESP - *Campus* de Bauru, para Obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Co-orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

Bauru

2012

Silva, José Fernandes da Neto

Estudo experimental da remoção, por jato de ar comprimido de detritos na superfície de corte de rebolo diamantado durante a retificação da alumina refrigerada pela técnica MQL/

José Fernandes da Silva Neto, 2012. 108 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012

1. Retificação externa. 2. Mínima quantidade de lubrificação (MQL). 3. Limpeza das arestas de corte. 4. Dano ambiental. 5. Cerâmica. I. Universidade



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JOSÉ FERNANDES DA SILVA NETO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 15 dias do mês de junho do ano de 2012, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Comélio Procópio, Prof. Dr. CELSO NAVES DE SOUZA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Comélio Procópio, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de JOSÉ FERNANDES DA SILVA NETO, intitulado "ESTUDO EXPERIMENTAL DA REMOÇÃO, POR JATO DE AR COMPRIMIDO, DE DETRITOS NA SUPERFÍCIE DE CORTE DE REBOLO DIAMANTADO DURANTE A RETIFICAÇÃO DA ALUMINA REFRIGERADA PELA TÉCNICA MQL". Após a exposição, o discurso foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

Carlos Elias da Silva Junior
 Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR

Prof. Dr. CELSO NAVES DE SOUZA

Dedico este trabalho aos meus pais Hélio e Edméia,
minha esposa Érica e ao meu filho Pietro

AGRADEÇO

Primeiramente agradeço a DEUS por me dar força, saúde, disposição e condições necessárias para a realização deste trabalho.

À Nossa Senhora- “Ó Maria concebida sem pecado, rogai por nós que recorremos a vós”.

À Minha querida esposa Érica Almeida Silva, incondicional no seu amor.

Ao meu filho amado Pietro Almeida Fernandes.

Aos meus pais Hélio Fernandes da Silva e Edméia Dias da Silva, exemplos de generosidade, fé, dignidade e zelo pela família.

Aos meus irmãos Rodrigo Fernandes da Silva e Hélio Fernandes da Silva Junior pelo apoio e carinho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pelo constante auxílio, ajuda e confiança, desde o início deste trabalho. Expresso minha gratidão e apreço não somente aos conhecimentos compartilhados, mas também pelas lições de vida e exemplo de ser humano.

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, pelas sugestões e na co-orientação do meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, pela grande contribuição e apoio cedidos durante a realização do Projeto no Laboratório de Aquisição e Processamento de Sinais – LADAPS.

Agradeço à empresa Máquinas Agrícolas Jacto S.A., especialmente a Humberto Fujita, pela doação dos corpos de provas, conselhos que, com certeza, foram de essencial importância para este trabalho.

À Universidade Estadual Paulista - UNESP, que tem como grande preocupação a melhor formação acadêmica do aluno, e à Faculdade de Engenharia de Bauru, na pessoa de seus professores, que estão contribuindo para o esclarecimento de dúvidas e através do LUA – Laboratório de Usinagem por Abrasão.

Agradeço à empresa Torcomp Usinagem & Componentes, em especial ao Jerônimo de Freitas pela grande contribuição e apoio para realizar esse estudo.

Ao amigo Matheus Gonçales Pereira, pela dedicação e empenho na realização deste projeto.

Aos meus familiares e amigos que sempre me apoiaram em minhas escolhas.

Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si mesmo.

(Ayrton Senna)

RESUMO

No processo de retificação a utilização de fluidos de corte é uma maneira de implementar a qualidade final ao processo, pois os fluidos têm como finalidade a lubrificação na área de contato entre a peça e ferramenta e a refrigeração das superfícies, assim evitando danificações na superfície da peça. Com isso, a utilização de fluidos de corte tem sido constantemente estudada, visando diminuir a utilização deste, pois a utilização de fluidos de corte tem seus problemas. O custo do produto final aumenta consideravelmente com o uso de fluidos de corte no processo de retificação, além de que os fluidos de corte são substâncias tóxicas e nocivas tanto às pessoas quanto ao meio ambiente. Portanto indústrias, universidades e centro de pesquisas são levados a pesquisar métodos alternativos menos prejudiciais ao meio ambiente. Dentre as alternativas surge a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL), que também tem suas desvantagens, como por exemplo, a formação de uma borra de óleo na superfície de corte do rebolo, o que gera uma rugosidade maior na peça. Porém, visando minimizar esse problema podem ser usados jatos de ar comprimido incidindo na superfície de corte do rebolo, com o objetivo de limpar a superfície do rebolo. Dessa forma, avaliou-se a eficiência desse sistema de ar comprimido para a limpeza e pôde-se verificar que, a utilização da limpeza juntamente com a técnica do MQL, torna-se viável, pois de uma maneira geral a técnica do MQL com limpeza obteve melhores resultados na qualidade da peça e desgaste da ferramenta, em relação ao MQL sem limpeza. A limpeza com um ângulo tangente à superfície do rebolo foi a condição de limpeza que obteve melhores resultados para a limpeza o que comprova que a melhoria na técnica do MQL não produz, necessariamente, resultados tão satisfatórios quanto a técnica convencional. Porém a técnica do MQL com limpeza tem suas vantagens, na área ambiental e em relação a saúde do operador, podendo assim mesclar as vantagens do MQL, com resultados mais próximos dos resultados da refrigeração convencional. Avaliou-se os resultados finais da retificação cilíndrica externa da cerâmica refrigerada com a mínima quantidade de lubrificante, em termos de acabamento superficial e desgaste da ferramenta abrasiva, principalmente. Este estudo foi feito por meio da análise das variáveis de saída do processo de retificação externa como o comportamento de potência de corte, emissão acústica, rugosidade, desgaste diametral, desvio de circularidade e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Palavras chaves: Retificação externa, mínima quantidade de lubrificante (MQL), danos ambiental, cerâmica, limpeza das arestas de corte do rebolo, jatos de ar comprimido.

ABSTRACT

In grinding process the use of cutting fluids is a way to implement the final quality of the process because the fluids are intended for the lubrication in the contact area between the work piece, the tool and the cooling of the surfaces avoiding damages on the work piece surface. However, the use of cutting fluids has been constantly studied in order to reduce its use since this practice brings a lot of problems about. The final product cost increases considerably along with the use of cutting fluids in grinding process, besides those substances are toxic and harmful to people and to the environment as well. Therefore, industries, universities and research center have been taken as sites for investigating less harmful alternative methods to the environment. Among such alternatives comes up of minimum quantity of lubricant technique (MQL), which also has some disadvantages, such as the formation of oil sludge on the cut surface of the wheel, which creates a greater surface roughness on the work piece. However, in order to minimize this problem compressed air jets can be used focusing on the cut surface of the wheel, in order to clean it. Thus, we could evaluated the effectiveness of that compressed air system used for cleaning, and it was possible to observe that the use of cleaning with the MQL technique is feasible because from a general view the use of the MQL technique in the cleaning process showed better results in the quality of the work piece and wornout of the tool comparing to the MQL with no cleaning. The cleaning with a tangent angle to the surface of the wheel was the condition of cleanliness that showed better results for the cleanliness which proves that the improvements for the MQL technique does not lead to significant results compared to the conventional technique. However, the MQL technique with cleanliness has its advantages towards the environmental area and in relation to operator health, so one can mix up the advantages of MQL and get closer results in relation to the conventional refrigeration. We assess the outcomes of the external cylindrical grinding of the cooled ceramics with the minimum quantity of lubricant in terms of surface finishing and abrasive tool wornout, mostly. This study was done by examining the evaluation of the output variables of the grinding process as the external behavior of cutting power, acoustic emission, roughness, diametrical wornout, circularity deviation and scanning electron microscopy(SEM).

Keywords: external grinding, minimum quantity of lubricant (MQL), environmental damages, ceramics, cleaning of the cutting wheels edges, jets of compressed air.

Sumário

| | | |
|---------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. | OBJETIVO | 3 |
| 3. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 3.1 | A Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho | 4 |
| 3.1.1 | Parâmetros do processo de retificação | 6 |
| 3.1.2 | Comprimento de contato (L_c) | 6 |
| 3.1.3 | Profundidade de Corte | 7 |
| 3.1.4 | Espessura Equivalente de Corte (h_{eq}) | 7 |
| 3.1.5 | Velocidade de Corte (v_s) | 8 |
| 3.1.6 | Velocidade da Peça (v_w) | 8 |
| 3.1.7 | Velocidade de mergulho (v_f) | 9 |
| 3.1.8 | Taxa de Remoção de Material (Q_w) | 9 |
| 3.2 | Cerâmicas Avançadas | 10 |
| 3.2.1 | Dureza dos materiais cerâmicos | 12 |
| 3.2.2 | Fratura em materiais cerâmicos | 13 |
| 3.3 | Utilização de rebolos diamantados no processo de retificação | 15 |
| 3.3.2 | O rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN) | 16 |
| 3.3.3 | Os Problemas dos Fluidos de Corte | 17 |
| 3.3.4 | Otimização na aplicação dos fluidos de corte na retificação | 19 |
| 3.4 | Formas Alternativas de Lubri-Refrigeração No Processo de Retificação | 20 |
| 3.5 | A Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) | 21 |
| 3.5.1 | Problemas Relacionados com a Mínima Quantidade de Lubrificação | 25 |
| 3.5.2 | Fenômeno do empastamento das porosidades do rebolo | 26 |
| 3.6 | Limpeza da superfície de corte de rebolos entupidos por cavacos | 28 |
| 3.6.1 | Limpeza a laser | 28 |
| 3.6.2 | Limpeza por um sistema secundário de fluido de corte | 29 |
| 3.6.3 | A utilização de jatos de ar comprimido para a limpeza do rebolo no processo de retificação | 30 |
| 3.7 | Variáveis de Saída no Processo de Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho | 32 |
| 3.7.1 | Força tangencial de corte | 32 |
| 3.7.2 | Energia Específica (u_c) | 34 |
| 3.7.3 | Emissão Acústica (EA) | 35 |
| 3.7.4 | Desvio de Circularidade | 37 |
| 3.7.5 | Rugosidade | 38 |
| 3.7.6 | Desgaste diametral do rebolo | 39 |
| 3.7.7 | Microscopia Eletrônica de Varredura | 40 |
| 4. | MATERIAIS E MÉTODOS | 41 |
| 4.1 | Equipamentos Utilizados | 41 |
| 4.1.1 | Retificadora cilíndrica externa | 41 |
| 4.1.2 | Corpos de Prova | 44 |
| 4.1.2.1 | Mandril para fixação dos corpos-de-prova | 45 |
| 4.1.3 | Rebolo Utilizado | 46 |
| 4.1.4 | Dressador | 46 |
| 4.1.5 | O sistema de refrigeração convencional | 47 |
| 4.1.6 | O sistema MQL | 48 |
| 4.2 | CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA | 55 |
| 4.2.1 | Aquisição de Dados | 55 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2.2 | Potência de Retificação | 57 |
| 4.2.3 | Emissão Acústica | 60 |
| 4.2.4 | Circularidade | 62 |
| 4.2.5 | Rugosidade | 63 |
| 4.2.6 | Limpeza das peças | 64 |
| 4.2.7 | Desgaste diametral do rebolo | 64 |
| 4.2.8 | Microscopia Eletrônica de Varredura..... | 67 |
| 4.4 | Condições de usinagem obtidas nos Ensaios preliminares | 72 |
| 4.4.1 | Seqüência da realização dos Ensaios | 73 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 76 |
| 5.1 | Rugosidade | 76 |
| 5.2 | Desgaste Diametral do Rebolo..... | 78 |
| 5.3 | Circularidade | 79 |
| 5.4 | Potência de Retificação | 80 |
| 5.5 | Emissão Acústica | 82 |
| 5.6 | Microscopia Eletrônica de Varredura..... | 83 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 86 |
| 7 | PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS..... | 87 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 88 |

Índice de Figuras

| | |
|--|-----------|
| Figura 1: Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho. | 4 |
| Figura 2: Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho | 5 |
| Figura 3: Penetradores para medição de microdureza | 12 |
| Figura 4: °. Desenho esquemático do modelo de Griffith. | 14 |
| Figura 5: Bocal construído por Webster et al. | 19 |
| Figura 6: Bocal de sapata | 20 |
| Figura 7: Fenômeno do empastamento do rebolo. | 27 |
| Figura 8: Rebolo empastado com cavacos aderidos (aumento de 100X). | 28 |
| Figura 9: Limpeza a laser da superfície de corte do rebolo | 29 |
| Figura 10: Influência da limpeza do rebolo no patamar de energia específica | 30 |
| Figura 11: Retificação sem limpeza do rebolo | 31 |
| Figura 12: Retificação com limpeza do rebolo. | 31 |
| Figura 13: Variação da profundidade do canal retificado | 32 |
| Figura 14: Representação da retificação cilíndrica externa de mergulho | 33 |
| Figura 15: Redução brusca da energia de retificação com aumento da espessura máxima teórica do cavaco | 35 |
| Figura 16: Retificadora cilíndrica universal, CNC. | 42 |
| Figura 17: Corpo de prova | 45 |
| Figura 18: Mandril para a fixação do corpo de prova e seus componentes. | 45 |
| Figura 19: Rebolo diamantado da Dinser Ferramentas Diamantadas. | 46 |
| Figura 20: Dressador conglomerado. | 47 |
| Figura 21: Unidade de controle do MQL | 49 |
| Figura 22: Projeto do bocal para experimentação com MQL. | 50 |
| Figura 23: Sistema de ar comprimido para o MQL. | 51 |
| Figura 24: Sistema de ar comprimido para a limpeza de rebolo | 52 |
| Figura 25: Demonstração das partes funcionais do bocal para limpeza do rebolo. | 53 |
| Figura 26: Detalhe dos ângulos de incidência do jato de ar comprimido | 53 |
| Figura 27: Fixação do bocal de limpeza | 54 |
| Figura 28: Dois bocais a 90° “direcionados ao centro do rebolo” | 54 |
| Figura 29: Montagem dos equipamentos para aquisição dos dados. | 55 |
| Figura 30: Tela de apresentação do programa de aquisição de dados | 56 |
| Figura 31: Circuito eletrônico (CurvoPower) para aquisição da força tangencial de corte | 57 |
| Figura 33: Calibração da rotação do rebolo | 59 |
| Figura 34: Sensor fixo posicionado no cabeçote móvel. | 61 |
| Figura 35: Medidor de circularidade. | 62 |
| Figura 36: Detalhe do circularímetro | 63 |
| Figura 37: Operação de medição de rugosidade | 64 |
| Figura 38: Processo de marcação do rebolo. | 65 |
| Figura 39: Esquema da medição do desgaste do rebolo. | 66 |
| Figura 41: Disco de corte diamantado utilizado para o corte das peças | 67 |
| Figura 42: Amostra Embutida. | 68 |
| Figura 43: Politriz Metalográfica. | 68 |
| Figura 44: Amostras preparadas para o MEV, com a deposição de ouro | 69 |
| Figura 45: Equipamento utilizado para deposição nanométrica de ouro nos corpos de prova | 70 |
| Figura 46: Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado | 71 |
| Figura 47: Matriz original de ensaios | 73 |
| Figura 48: Operação de dressagem do rebolo. | 74 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 49: Resultados de rugosidade para as diferentes condições de lubri-refrigeração | 76 |
| Figura 50: Resultados de desgaste diametral do rebolo para as diferentes condições de lubri-refrigeração | 78 |
| Figura 51: Circularidades para as diferentes condições de lubri-refrigeração | 79 |
| Figura 52: Resultados de potência de retificação para as diferentes condições de lubri-refrigeração | 81 |
| Figura 53: Resultados de emissão acústica para as diferentes condições de lubri-refrigeração | 82 |
| Figura 54: Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração convencional (1000 x) | 83 |
| Figura 55: Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração da técnica do MQL sem limpeza (1000 x)..... | 84 |
| Figura 56: Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração da técnica do MQL com limpeza tangente (1000 x)..... | 85 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|-----------|
| Tabela 1 Características Físicas e Mecânicas de Algumas Cerâmicas..... | 11 |
| Tabela 2: Programa CNC para usinagem do corpo de prova..... | 43 |
| Tabela 3: Programa CNC para Usinagem do corpo de prova para medição de desgaste de Rebolo..... | 44 |
| Tabela 4: Valores da frequência, rotação e tensão utilizados para a calibração da curva de rotação do rebolo..... | 59 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|---|-------------------------|
| a – profundidade de corte | (μm) |
| ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas | |
| a_d - profundidade de dressagem | (μm) |
| Al₂O₃ - óxido de alumínio | |
| ASTM - American Society for Testing and Materials | |
| b - largura média no topo dos grãos abrasivos | (mm) |
| c - comprimento da trinca crítica | (μm) |
| CaO – óxido de cálcio | |
| CBN – nitreto cúbico de boro | |
| CNC - comando numérico computadorizado | |
| CVD - chemical vapor deposition | |
| h_{max} – espessura máxima do cavaco | (μm) |
| D_e – diâmetro equivalente | (mm) |
| D_s – diâmetro do rebolo | (mm) |
| D_w – diâmetro da peça | (mm) |
| E – módulo de elasticidade ou módulo de Young | (GPa) |
| F_n – força normal de corte | (N) |
| F_T – força tangencial de corte | (N) |
| G – relação entre volume de material removido e volume de rebolo gasto | |
| H – dureza do material | (GPa) |
| h_{eq} – espessura equivalente de corte | (μm) |
| HV – dureza Vickers | (GPa) |
| L_c – comprimento de contato | (mm) |
| IFSC – Instituto de Física de São Carlos | |
| ISO - International Organization for Standardization | |
| K_{ic} – tenacidade à fratura | (MPa.m ^{1/2}) |
| K_s – pressão específica de corte | (N/m ²) |
| K_n – tensão de escoamento do material | (N/m ²) |
| L – espaçamento entre grãos abrasivos | (μm) |
| MEV - microscópio eletrônico de varredura | |
| MgO – óxido de magnésio | |
| MQL – mínima quantidade de lubrificação | |

| | |
|---|----------------------|
| N – número de encontros dos grãos abrasivos ativos com a peça | |
| P – força normal aplicada aos grãos abrasivos | (N) |
| p_b – probabilidade do grão ser desalojado devido à fratura do aglomerante | |
| Q_w – taxa de remoção de material | (mm ³ /s) |
| Q'_w – taxa específica de remoção de material | (mm ² /s) |
| R – fator de resistência ao desgaste | |
| Sic – carbetos de silício | |
| S_iO₂ – óxido de silício | |
| t – tempo de retificação | (s) |
| t_s – tempo de centelhamento | (s) |
| USP – Universidade de São Paulo | |
| V – volume de material removido por unidade de distância de deslizamento | (mm ³ /m) |
| V_f – velocidade de mergulho ou avanço | (m/s) |
| V_s – velocidade tangencial do rebolo | (m/s) |
| V_w – velocidade tangencial da peça | (m/s) |
| W – peso médio de cada grão | (g) |
| Z_rO₂ – óxido de zircônia | |
| Z_s – volume de rebolo gasto | (mm ³) |
| Z_w – volume de material removido | (mm ³) |
| ξ – constante adimensional | |
| δ - desgaste radial do rebolo | (mm) |
| σ - tensão de ruptura | (Mpa) |
| y - constante que relaciona o tamanho da falha com o tamanho da amostra | |
| γ_i - energia superficial por unidade de área para iniciar a fratura | (J/m ²) |
| α = constante independente do material | |

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem onde a principal característica é o atrito por abrasivos. A abrasão, por sua vez, está em progresso desde o início dos tempos (Salmon, 1992). No setor industrial, a retificação é empregada principalmente nas áreas onde há a necessidade de elevada qualidade dimensional e acabamento superficial do componente usinado.

Dessa forma, retificar remete a um processo preciso onde o material da peça é removido pela ação mecânica de um grão abrasivo de tamanho e forma irregulares, produzindo, assim, a superfície usinada. Em função dessa característica técnica, as inúmeras arestas de cortes formadas pelos grãos do rebolo necessitam de uma grande quantidade de energia por unidade de volume de material removido. Essa energia, pois, é convertida em calor, o qual fica concentrado na zona de corte (Malkin, 1989).

Assim, a preocupação fundamental no processo relaciona - se aos efeitos prejudiciais que as elevadas temperaturas podem causar à peça (queima superficial, transformações microestruturais) e também à ferramenta. Dessa forma, o uso de refrigerantes, como os fluidos de corte, é empregado para que remova grande parte do calor gerado, principalmente pelo atrito e deformação plástica resultantes da interação entre o grão do rebolo e a peça (Shillor *et al.* 2004). Assim, esses fluidos auxiliam na obtenção da qualidade dimensional e superficial do componente retificado através das propriedades de lubrificação e refrigeração. Além disso, se não forem utilizados pode haver ainda mais danos à peça e ao rebolo devido ao entupimento de seus poros por meio dos cavacos gerados.

No entanto, o uso de fluidos de corte deve ser feito de forma consciente, pois estes podem causar danos aos trabalhadores das indústrias e também ao meio ambiente. Assim, essa forma de lubri-refrigeração convencional agrega mais custo ao processo de retificação, pois, a partir disso, deve-se tratar com cautela a proteção das pessoas e o correto descarte da substância tóxica no meio ambiente.

Com base nisso, esforços enormes para reduzir o uso de fluidos de corte têm sido desafios do ponto de vista econômico, ecológico e a manutenção da saúde humana. Assim, como a consciência ambiental é requerida a fim de reduzir os impactos no ambiente de trabalho e no meio ambiente global, associada às reduções de custos, surgiram alternativas de lubri-refrigeração, entre elas a mínima quantidade de lubrificante (*MQL*), já que a retificação a seco é impossível em função da geração excessiva de calor (Weinert *et al.* 2004).

O uso da mínima quantidade de lubrificante é feito com base na mistura de ar comprimido e óleo onde esses componentes apresentam a função de refrigerar e lubrificar, respectivamente. No entanto, em trabalhos já realizados em laboratório para a retificação plana do aço e cilíndrica externa da cerâmica, essa alternativa tem apresentado, de modo geral, dificuldades na obtenção de bons parâmetros de rugosidade superficial e desgaste do rebolo mesmo havendo a constatação, em certos casos, da diminuição da força tangencial de corte e energia específica que decorrem da boa lubrificação.

A tal deficiência associada ao uso da mínima quantidade de lubrificante está alicerçada no trabalho de Sahn & Schneider (1996), pois quando são usadas ferramentas abrasivas com uma redução no uso de fluidos de corte, fica dificultada a limpeza dos cavacos na zona de corte e conseqüentemente ocorre um aumento no entupimento dos poros do rebolo, comprometendo a qualidade final da peça, em especial. Como o MQL usa baixo fluxo de fluido, não é conseguida uma limpeza eficiente usando essa técnica, pois, ao invés de os cavacos serem expelidos, eles se misturam ao fluido do MQL e originam uma “borra” de óleo com cavacos que aderem à superfície de corte da ferramenta, entupindo seus poros conforme verificado em experimentos.

Em contra partida, essa necessidade pode ser suprida com o uso de jatos adicionais de ar comprimido na superfície de corte do rebolo para efetuar a limpeza do mesmo durante o processo de retificação com MQL. Em função disso, a utilização da limpeza do rebolo durante a retificação é, portanto, um método que evidencia uma maior eficiência ao uso da mínima quantidade de lubrificante, tornando-se uma alternativa ecologicamente viável.

2. OBJETIVO

Este trabalho teve por objetivo propor a limpeza da aresta da superfície de corte de rebolos diamantados, na retificação de cerâmicas, utilizando um bocal de limpeza. Para isso será verificado qual o melhor ângulo de inclinação deste bocal com relação à incidência de um jato de ar, a alta velocidade, na superfície de corte do rebolo. Assim, serão analisados, o método convencional, MQL sem limpeza, MQL tangente, MQL 30°, MQL 60°, MQL90° (ângulos de inclinação do jato de ar) para a limpeza e com isso pretende-se identificar qual ângulo proporcionará os melhores resultados finais no processo de retificação (como menores valores de rugosidade e desgaste da superfície de corte do rebolo, dentre outros). Também foi verificado o número de bocais de limpeza necessário para que haja uma acentuada melhoria das variáveis de saída do processo de retificação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica elaborada a seguir aborda os principais conceitos relativos ao tema que será desenvolvido: a retificação cilíndrica externa de mergulho, os parâmetros e variáveis de saída, as cerâmicas avançadas, o rebolo diamantado, aplicação dos fluidos de corte, limpeza da superfície de corte dos rebolos, entre outros assuntos pertinentes ao tema.

3.1 A Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho

Destaca-se entre as variações da operação de retificação a cilíndrica externa de mergulho, pois é um processo rápido e econômico. Na retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo executa movimento de avanço numa direção perpendicular à superfície retificada. O rebolo normalmente é mais largo que o comprimento da peça, há possibilidade de se fazer a retificação de várias superfícies simultaneamente através da montagem de diversos rebolos ou a retificação de perfis, através da afiação do rebolo no perfil adequado (DINIZ *et al.*, 2008). A retificação cilíndrica externa de mergulho é apresentada na Figura 1.

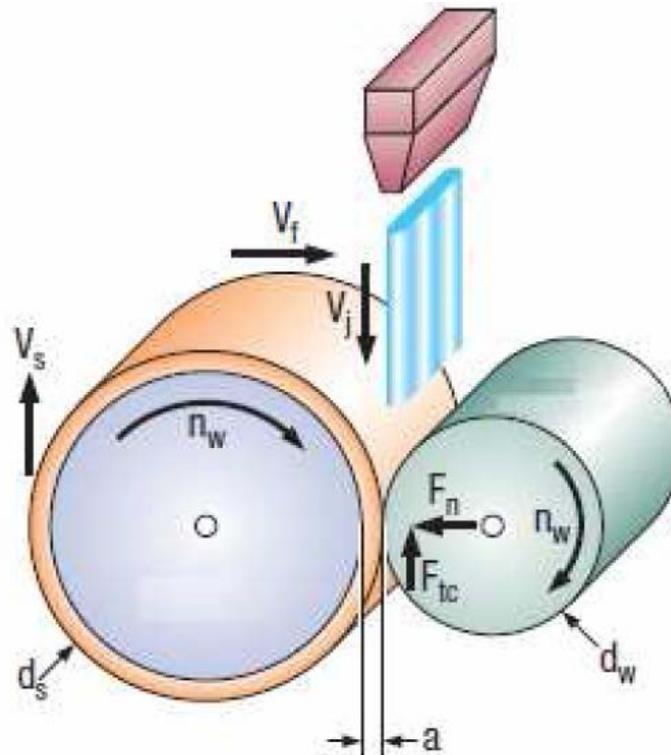


Figura 1: Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho. (Malkin 1989, modificado)

Segundo Soares & Oliveira (2002), o ciclo de retificação é entendido como o conjunto de etapas que ocorrem em uma operação, desde a colocação da peça na máquina até

a saída desta dentro de especificações pré-determinadas. O ciclo de retificação é subdividido em fases e, cada uma possui um tempo para sua execução.

Soares & Oliveira (2002) demonstram, na Figura 2, o ciclo de retificação e as respectivas etapas.

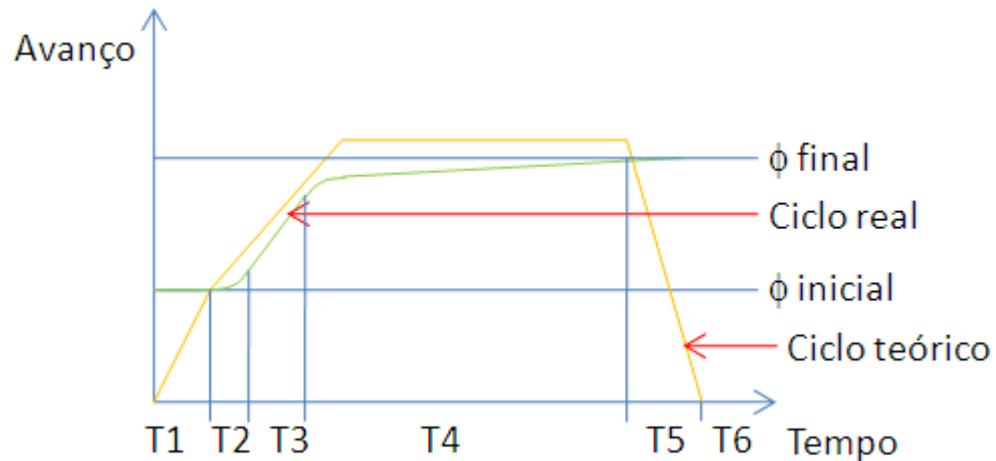


Figura 2: Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (adaptado de SOARES & OLIVEIRA, 2002)

Uma descrição dos intervalos de tempo indicados na figura 2 é feita a seguir:

- T1: deslocamento do rebolo em direção à peça, sem remoção de material;
- T2: início do contato entre o rebolo e a peça, proporcionando deformações elásticas em ambos e também na máquina. Estas deformações são responsáveis pelo atraso entre a posição real do rebolo e a posição indicada pelo comando da máquina. Também nesta fase inicia-se a formação do cavaco.
- T3: atinge-se a profundidade de corte estabelecida para um ciclo;
- T4: período de centelhamento (spark out), onde não há avanço do rebolo, permitindo, desta forma, eliminar as deformações adquiridas durante o período T2. O tempo de spark out é de fundamental importância dentro de um ciclo de retificação, pois é neste momento que se atinge as tolerâncias dimensionais e geométricas com reduzidos valores de rugosidade superficial, característicos do processo de retificação;
- T5: afastamento do rebolo, permitindo a retirada da peça usinada e a colocação de outra peça a ser trabalhada;
- T6: realização de uma possível operação de dressagem, a qual é composta pelo movimento do rebolo até o dressador, pela dressagem propriamente dita e pelo retorno do rebolo até a posição de trabalho.

A soma de todos os tempos das fases, descritas anteriormente, resulta no tempo total de retificação, que é um parâmetro significativamente importante no custo final da peça.

3.1.1 Parâmetros do processo de retificação

Os parâmetros de retificação foram criados com a finalidade de facilitar a compreensão de alguns fenômenos do processo. A seguir serão descritos os parâmetros do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.

3.1.2 Comprimento de contato (Lc)

Define a extensão de contato entre a peça e o rebolo. Pode ser calculado considerando apenas a geometria dos elementos em contato. Marinescu *et al.* (2007) equacionam o comprimento de contato conforme a equação 1.

$$L_c = \sqrt{a \cdot d_e} \quad (1)$$

Onde: Lc = comprimento de contato (mm); a = profundidade de corte (mm) e d_e = diâmetro equivalente (mm)

Segundo Malkin (1989), o comprimento de contato não considera os movimentos e deformações envolvidas e por isso ela descreve uma área aparente de contato entre a peça e o rebolo e, com isso, esse parâmetro pode ser descrito como comprimento de contato estático.

King & Hahn (1992) afirmaram que a diferença de curvatura entre a peça e o rebolo influencia no comprimento de contato. Além do mais, a diferença de curvatura entre a retificação cilíndrica externa e interna pode ser relacionada, segundo Guo & Malkin (2000), com a retificação plana através do diâmetro equivalente (d_e), conforme a equação 2.

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \frac{d_s}{d_w}} \quad (2)$$

Onde: d_s = diâmetro do rebolo (mm) e d_w = diâmetro da peça (mm).

Malkin (1989) ainda relata que, adota-se o sinal negativo quando se trata da retificação cilíndrica interna e o sinal positivo referindo-se à externa. Para a retificação plana, o diâmetro da peça (d_w) deve ser considerado infinito e, então, d_e = d_s. Ainda, segundo esse autor, a curvatura oposta do rebolo e da peça diminui (Lc) na retificação cilíndrica externa de

mergulho apresenta o menor comprimento de contato comparado as outras variações de processo. Considerando a equação (2), a retificação.

Anderson *et al.*, (2008) afirmam que a remoção de cavaco e a subsequente geração de calor ocorrem ao longo do comprimento de contato.

3.1.3 Profundidade de Corte

Segundo Malkin (1989), “a” é a profundidade que o rebolo entra na peça com uma velocidade v_f durante uma revolução completa da mesma. A profundidade de corte é definida pela equação 3.

$$a = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{V_w} \quad (3)$$

Onde: v_f = velocidade de avanço (mm/min) e v_w = velocidade da peça (mm/min).

Marinescu *et al.* (2004) relataram que a peça, o rebolo e a estrutura da máquina deformam quando se estabelece o contato entre o rebolo e a peça. Dessa forma, o real valor do parâmetro “a” é menor do que o calculado baseado na velocidade de avanço v_f . Isso ocorre devido às deflexões mecânicas e térmicas e o desgaste do rebolo. Entretanto, depois de certo tempo de avanço, as deflexões se estabilizam e se tornam constantes.

A profundidade de corte está amplamente relacionada com o parâmetro espessura equivalente de corte (h_{eq}), onde aumentando “a”, ocorre aumento dessa espessura e, com isso, maiores são os esforços de corte, o desgaste do rebolo e rugosidade (DINIZ *et al.*, 2008).

3.1.4 Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})

Segundo Shaw (1996), a espessura da camada de material removida pelo rebolo com a velocidade periférica do mesmo denomina-se espessura equivalente de corte h_{eq} , e é um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho. Heinzl & Bleil (2007) definiram esse parâmetro como a razão entre a taxa de remoção específica do material Q_w e a velocidade de corte V_s , conforme a equação 8:

$$h_{eq} = \frac{Q_w}{V_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{60 \cdot 1000 \cdot V_s} \quad (4)$$

Onde: h_{eq} = espessura equivalente de corte (mm)

Tal parâmetro melhor caracteriza o processo de retificação, uma vez que está englobando três importantes características do processo (V_s , V_f , d_w). A velocidade de corte, responsável pela “dureza dinâmica” do rebolo, cuja elevação proporciona o aumento do número de grãos ativos num mesmo intervalo de tempo, provoca o decréscimo na força de corte (Malkin, 1989).

Ainda de acordo com Malkin (1989), além da força de corte, a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada ao comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas tais como: rugosidade, topografia do rebolo, entre outros.

Segundo Marinescu *et al.*, (2004), esse parâmetro não leva em conta o espaçamento dos grãos do rebolo. É evidente que o comportamento da retificação se relaciona com a combinação da espessura equivalente de corte e a densidade das arestas de corte.

3.1.5 Velocidade de Corte (v_s)

Hwang *et al.* (2000) relataram que um aumento na velocidade do rebolo diminui a severidade do processo de corte pelo aumento da dureza dinâmica do rebolo. Adicionalmente Jackson *et al.* (2001) afirmaram que um aumento na velocidade do rebolo, melhora a qualidade final da peça, diminuindo o desgaste da ferramenta abrasiva.

Assim, em altas velocidades, costuma-se usar rebolos de ligante metálico ou eletro-depositado.

Graf (2004) define essa velocidade como a equação 5.

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (5)$$

Onde: v_s = velocidade de corte (m/s); n_s = rotação do rebolo (RPM).

3.1.6 Velocidade da Peça (v_w)

Essa velocidade representa a velocidade periférica da peça. De acordo com Graf (2004), a velocidade da peça V_w pode ser determinada em função do diâmetro e rotação da mesma, conforme equação 6. Ainda segundo esse autor, pode-se afirmar que o aumento da velocidade da peça acarreta em uma elevação da taxa de remoção de material, gerando cavacos mais grossos e maior carga sobre cada grão abrasivo do rebolo.

$$V_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (6)$$

Onde: n_w = rotação da peça (RPM)

3.1.7 Velocidade de mergulho (v_f)

A velocidade de mergulho v_f é definida como a velocidade de avanço do rebolo. (MONICI, 2006). Segundo Baldo (1994), no início do processo de retificação ou desbaste, remove-se cerca de 95% do material da peça, sendo que a velocidade de mergulho deve estar entre 0,4 a 2,0mm/min. Já para o acabamento, a velocidade de mergulho deve estar entre 0,1 a 0,3mm/min.

3.1.8 Taxa de Remoção de Material (Q_w)

De acordo com Malkin (1989), durante a retificação a taxa de remoção de material (Q_w) é um parâmetro determinado pela profundidade de corte (a), pela velocidade relativa entre a peça e o rebolo (V_w) e pela largura de retificação (b). Dessa forma, Demirci *et. al.* (2007) utilizam em seu trabalho a seguinte relação, segundo a equação 7, onde v_f é a velocidade de avanço e d_w é o diâmetro da peça:

$$Q_w = a \cdot v_w \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b \quad (7)$$

Onde: Q_w = taxa de remoção de material (mm^3/min); e b = largura de retificação (mm), v_f é a velocidade de avanço e d_w é o diâmetro da peça:

Ainda segundo Malkin (1989), pode-se obter a taxa específica de remoção de material (Q'_w), dividindo a taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de retificação (b) e, com base nesta taxa específica, pode-se avaliar a produtividade de um processo de retificação:

$$Q'_w = a \cdot v_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (8)$$

Onde: Q'_w = taxa de remoção de material específica ($\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{min}$)

3.2 Cerâmicas Avançadas

Os materiais cerâmicos normalmente apresentam deformação plástica pouco apreciável e reduzida resistência ao impacto, ou seja, baixa tenacidade. A baixa deformabilidade do seu retículo cristalino resulta em elevada rigidez e dureza. Em comparação com os metais, a energia de ativação é tão alta que o limite de resistência à fratura é atingido antes do movimento de discordâncias (Marinescu *et al.*, 1998).

Ainda de acordo com Marinescu *et al.* (1998), como a estrutura cristalina da cerâmica é menos simétrica que a estrutura dos metais, mesmo o aumento de temperatura, próximo ao ponto de fusão, não resulta na ativação de mais do que dois ou três sistemas de deslizamento de discordâncias. Assim, a baixa deformação plástica e a elevada dureza persistem mesmo em altas temperaturas, ao contrário dos metais.

Conforme Tonshoff *et al.* (1999), as cerâmicas estruturais têm de suportar cargas externas e ser montadas num conjunto mecanicamente ativo, consistindo geralmente de uma combinação de materiais. Para esta classe de cerâmicas, as propriedades mais relevantes são: alta dureza, alto módulo de elasticidade, alta resistência mecânica e alta resistência ao desgaste.

Segundo Mamalis *et al.* (2002), um fato em comum desses materiais, é que sua última camada de elétrons está incompleta. Dessa forma, por causa da ausência de elétrons livres, as cerâmicas são pouco reativas e são isolantes elétricos.

Ramesh *et al.* (2001), disseram que a cerâmica em geral é frágil e não pode suportar as grandes tensões internas induzidas por expansões térmicas. Assim, as cerâmicas são divididas geralmente em dois grupos principais: as óxidas e as não-óxidas.

As ligações atômicas e as estruturas cristalinas desses materiais governam suas propriedades. A estrutura cristalina das cerâmicas é uma das mais complexas dentre todos os materiais, pois contém vários elementos de diferentes tamanhos. A ligação entre seus átomos é geralmente covalente (elétrons compartilhados, caracterizando portanto, ligação forte) e iônica (ligação primária entre íons de carga oposta, o que caracteriza ligação forte também). Esses tipos de ligações são muito mais fortes do que ligações metálicas. Conseqüentemente, a dureza e a resistência térmica e elétrica das cerâmicas podem ser significativamente maiores que as de metais. A relação entre ligações covalentes e ligações iônicas varia na proporção de 4:6 (Al_2O_3 e cerâmicas óxidas) a 9:1 (SiC e cerâmicas não-óxidas). As diferenças no tipo de ligação atômica são responsáveis pelas variações de dureza e do módulo de Young dos materiais cerâmicos.

As cerâmicas com ligações covalentes são geralmente de alta dureza, rígidas e tem uma alta temperatura de fusão.

Uma visão mais geral das cerâmicas óxidas e não óxidas com suas características físicas e mecânicas é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 Características Físicas e Mecânicas de Algumas Cerâmicas (Mamalis *et al.*, 2002)

| | Densidade (g/cm ³) | Dureza Vickers, HV (MPa) | Módulo de Elasticidade E (GPa) | Tenacidade à Fratura, K _{ic} (MPa√m) | Resistência à Flexão (MPa) | Condutividade Térmica (W/m-K) | Rigidez (N/mm) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|---|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Al ₂ O ₃ | 3,8... 4,2 | 161,8 | 344 | 4 | 304 | 25 | 360 |
| ZrO ₂ | 5,9 | 127,5 | 206 | 5 | 980 | 28 | 420 |
| SiC | 3,1... 3,2 | 245,2 | 392 | 3,6 | 490 | 59 | 700 |
| B ₄ C | 2,5 | 255 | 300 | 7,5 | 700 | 29 | 400 |
| Si ₃ N ₄ PQ | 3,2 | 147,1 | 294 | 6 | 588 | 30 | 690 |
| Si ₃ N ₄ SR | 2,5 | 166,7 | 345 | 6 | 750 | 17 | 215 |
| C45 | 7,8 | - | 210 | 120 | | 50 | 600 |

PQ: Si₃N₄ obtido por prensagem a quente

SR: Si₃N₄ obtido por sinterização reativa

De acordo com Mamalis *et al.* (2002) analisando-se a tabela 1, nota-se que as densidades das cerâmicas são menores que as dos aços, devido às distâncias interatômicas serem grandes, e a densidade dos elétrons pequena. Ligações covalentes possuem uma grande energia de ligação, ($1,1 \times 10^{-17} \text{ J/átomo}$), que é quase 1000 vezes maior que a energia das ligações metálicas, ($1,5 \times 10^{-20} \text{ J/átomo}$). Em tais estruturas, a densidade de discordâncias é pequena e sua mobilidade prejudicada, aumentando assim, os valores de dureza (HV) e rigidez. A rigidez é também indicada pelo valor do módulo de elasticidade ou de Young (E), mas é mais perceptível quando se compara o quociente E / HV das cerâmicas com o dos aços. No caso de um material altamente dúctil (aço), o valor E / HV é alto, cerca de 250, enquanto que num material altamente frágil (cerâmica) é por volta de 20. A resistência à fratura K_{ic}, ou a resistência à flexão, são fatores também associados diretamente à rigidez e fragilidade.

Segundo Mamalis *et al.* (2002), o número de peças feitas com material cerâmico tem crescido gradualmente no campo da Engenharia Mecânica nos últimos tempos. A cerâmica usada em peças mecânicas é denominada “cerâmica avançada”, e é diferente da tradicional e conhecida cerâmica. Ela tem vantagens em relação a outros materiais devido a três características principais: elevada dureza, grande resistência ao desgaste e capacidade de

operação em altas temperaturas (2000°C). Um exemplo de utilização é constatado em motores e turbinas a gás, que contêm peças com as peculiaridades acima citadas.

3.2.1 Dureza dos materiais cerâmicos

A dureza pode ser definida como a resistência de um material à penetração por uma ponta (Askeland & Phulé, 2003). Do ponto de vista físico, a dureza está relacionada com a estrutura cristalina do material e assim pode ser derivada somente das forças interatômicas. Contudo, na prática, a dureza é uma propriedade que depende de características microestruturais como porosidade, tamanho de grão, contornos de grãos, movimentação de discordâncias e de outras propriedades relacionadas à temperatura (Rice, 2000).

Os testes mais comuns para medidas de dureza em cerâmicas são os testes de microdureza Knoop e Vickers. Estas técnicas são diferenciadas pelo tamanho e geometria do penetrador e consistem na medida da resistência à deformação plástica permanente, causada pela indentação. Obtida pela razão entre a carga aplicada e a área de superfície projetada da indentação criada em consequência do teste. Na Figura 3 são apresentadas duas geometrias de penetradores, utilizados na determinação da microdureza Vickers e Knoop.

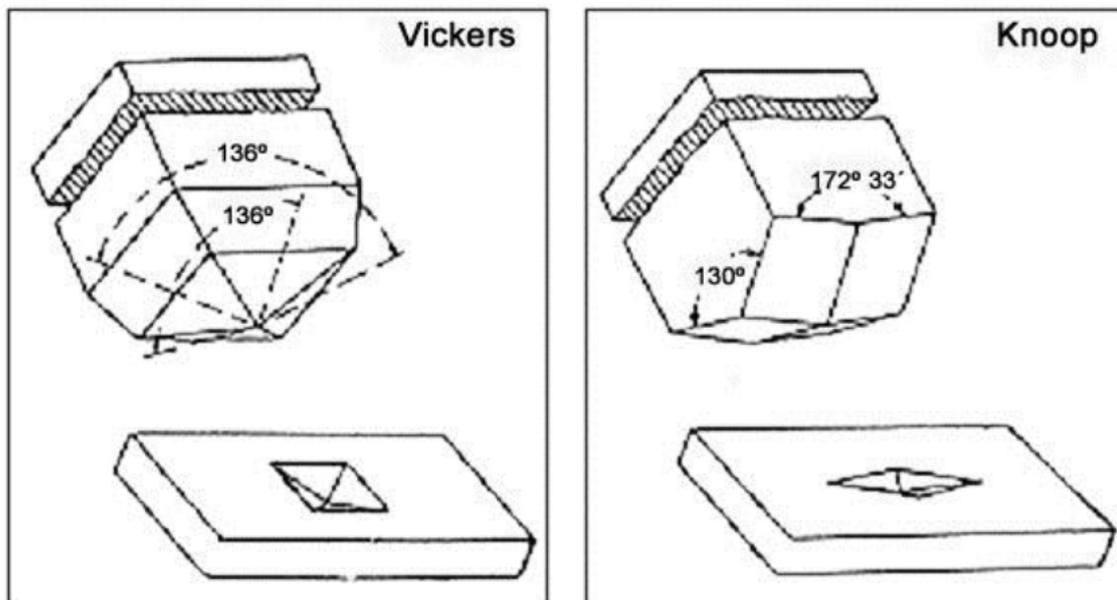


Figura 3: Penetradores para medição de microdureza (Khenafes, 2006).

Blaedel *et al.* (1999) citaram que o procedimento de impressão por deformação plástica do penetrador no material (“indentation”) permite quantificar a fragilidade das

cerâmicas e que pode ser expressa através da razão (índice de fragilidade) entre a dureza e a tenacidade à fratura da cerâmica. A tenacidade à fratura mede a resistência de um material à fratura, na presença de uma falha (Askeland, 2003). Assim, o índice de fragilidade é expresso por:

$$B = \frac{H}{K_{IC}} \quad (9)$$

Onde: H = dureza do material; K_{IC} = tenacidade à fratura do material.

3.2.2 Fratura em materiais cerâmicos

É possível encontrar grandes variações de resistência mecânica entre peças de um mesmo lote, podendo ocorrer que a resistência máxima seja o dobro da mínima. Esta discrepância e a grande variabilidade de valores de resistência mecânica são causadas pela fratura frágil e explicadas pela teoria de Griffith.

A teoria de Griffith considera que um corpo frágil contém pequenas falhas (microtrincas). Quando um esforço de tensão externo é aplicado, as pontas das microtrincas atuam como concentradores de tensão, propiciando a corrosão sob tensão. Como o corpo não pode liberar estas tensões através de deformação plástica, a tensão local na região próxima à ponta da microtrinca mais severa (crítica) aumenta até atingir a resistência teórica, causando a ruptura do corpo. A equação de Griffith que descreve este processo é:

$$\sigma = \frac{1}{y} \left(\frac{2\gamma_i E}{c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Onde: □

σ = tensão de ruptura;

y = constante adimensional que relaciona o tamanho da falha com o tamanho da amostra;

γ_i = energia superficial por unidade de área para iniciar a fratura;

E = Módulo de elasticidade (Young);

c = comprimento da trinca crítica.

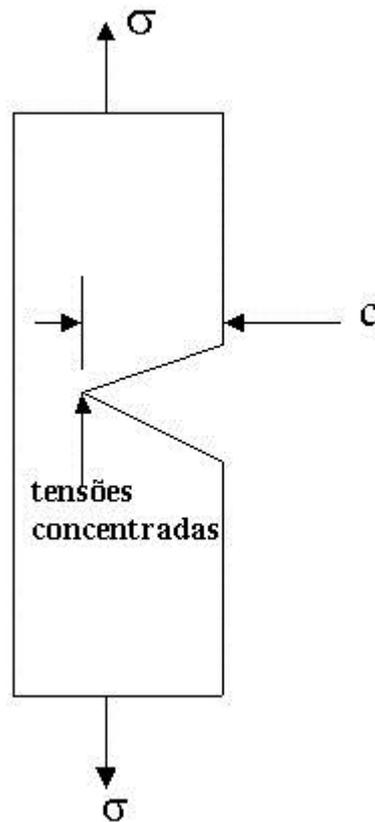


Figura 4: °. Desenho esquemático do modelo de Griffith. (Shackelford, 1996).

Na Figura 4 é apresentado um desenho esquemático que relaciona a tensão de ruptura do material cerâmico com a concentração de tensão na ponta da trinca crítica. A medida do trabalho de fratura está relacionada ao fator crítico de intensidade de tensão K_{IC} , também denominado tenacidade à fratura. Este fator descreve uma intensidade particular de tensão na ponta de uma trinca que é necessária para sua propagação e está relacionada com a energia de fratura (γ_i) através da relação:

$$K_{Ic} = \left(2\gamma_i E\right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Segundo a teoria de Griffith a resistência dos materiais cerâmicos é controlada principalmente por duas variáveis:

Energia específica de fratura (γ_i), que é uma propriedade do material sem defeitos e que depende de parâmetros microestruturais (como tamanho de grão);

Tamanho do defeito crítico (falha), que é uma característica microestrutural relacionada ao processamento do material.

3.3 Utilização de rebolos diamantados no processo de retificação

Rebolo é a ferramenta de corte utilizada no processo de retificação. Tal ferramenta é composta basicamente de grãos abrasivos de elevada dureza que efetuam o corte, presos a uma matriz aglomerante de um material menos duro e com porosidade entre os grãos que alojam os cavacos gerados até que saiam da região de corte.

O desempenho e as propriedades dos rebolos são dependentes dos seguintes fatores: material do grão abrasivo bem como o seu tamanho, material aglomerante, propriedades do abrasivo, do aglomerante e da porosidade (espaço vazio entre os grãos abrasivos no aglomerante). MARINESCU (2004).

Os rebolos diamantados utilizados na retificação de materiais cerâmicos são diferentes dos rebolos convencionais em três aspectos básicos: abrasivo, liga (aglomerante) e o corpo do rebolo.

Considerando a alta dureza dos materiais cerâmicos, o diamante é praticamente o único abrasivo utilizado em escala industrial. De acordo com Tönshoff *et al.* (1999), os diamantes usados na retificação de cerâmica são principalmente sintéticos, fabricados para otimizar sua dureza e densidade. O processo de síntese permite o controle de características, gerando grãos com alta resistência ao impacto ou com baixa resistência ao impacto (friável). Os diamantes friáveis são os mais apropriados para retificar cerâmica, pois ao se microfraturarem constantemente, regeneram as arestas de corte, gerando menores forças para a remoção do diamante da liga e limitando o dano à peça. Diamantes friáveis são adequados para ligas de menor resistência mecânica (resinóide) e os diamantes com maior resistência ao impacto para ligas com maior poder de retenção, ou seja, o tipo de abrasivo deve ser especificado em função do sistema ligante utilizado.

3.3.1 Fluidos de Corte

Segundo Runge & Duarte (1990), os fluidos de corte podem ser entendidos como qualquer espécie de fluido que é introduzida no mecanismo de usinagem para o corte de material e, dessa forma, acabam sendo parte integrante dos processos de produção na indústria metal - mecânica.

Conforme Ebbrell *et al.* (2000), as principais funções do fluido de corte são: lubrificação, refrigeração do conjunto peça/ferramenta, e retirada do cavaco da zona de corte. A lubrificação pelo fluido de corte reduz as forças envolvidas no processo evitando assim a

geração de calor na zona de corte. Dessa forma, o uso de fluidos de corte aumenta o desempenho da máquina operatriz. Com a correta escolha do fluido e modo de aplicação, pode-se obter uma economia no processo produtivo com a redução dos gastos da ferramenta e, através do aumento dos parâmetros de usinagem de 20-60%, um crescimento de produtividade de 10-50%.

Assim, de acordo com Sokovic & Mijanovic (2001), o uso de fluidos de corte aumenta a vida útil da ferramenta, contribui com uma economia no processo e aumenta a eficiência da produção como um todo. Além disso, a utilização dos mesmos promove menor desgaste da peça e da máquina com o fenômeno da corrosão (Stanford *et. al.* 2007).

Dessa forma, segundo Brinksmeier *et al.* (1999), os fluidos de corte proporcionam estabilidade ao processo através da combinação das propriedades de lubrificação e refrigeração. Com isso, é conseguido um alto nível de retificação, ou seja, produz-se superfícies com grandes qualidades de acabamento e tolerâncias dimensionais.

Segundo Runge & Duarte (1990) os fluidos de corte podem ser agrupados em quatro tipos básicos:

- Óleos de corte ou fluidos de corte (integral ou aditivado);
- Emulsionáveis convencionais (óleos solúveis ou emulsionáveis);
- Emulsionáveis semi-sintéticos;
- Soluções (fluidos sintéticos)

3.3.2 O rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN)

O superabrasivo, Nitreto de Boro Cúbico, foi introduzido em 1969 pela empresa General Electric com o nome borazon (Salmon, 1992).

Segundo Guo *et al.* (2007), os rebolos de CBN estão se tornando amplamente usados no lugar dos convencionais em diversos seguimentos industriais. Uma vez que o grão superabrasivo de CBN é conhecido pela sua alta resistência ao desgaste, a retificação com o mesmo ocasiona menores temperaturas, devido também à grande condutividade térmica dos grãos de CBN e menor a quantidade de calor transmitida à peça, na faixa de 20%, ao passo que esse percentual sobe para 60 - 70% com o uso de óxido de alumínio, resultando em menor tendência a danos térmicos e redução das indesejáveis tensões residuais.

Sua alta condutibilidade térmica, da ordem de 1300 W/m.K permite uma maior dissipação do calor gerado na região de corte implicando em menor incidência de danos térmicos (Marinescu *et al.* 2007). Um fator limitante para o emprego de rebolos superabrasivos e o seu elevado custo.

No entanto, quando se faz uma análise global dos custos, observa-se que com a utilização de rebolos de CBN tem-se uma redução do tempo de retificação, além de um menor número de trocas de ferramentas e paradas para ajuste visando compensar o desgaste do rebolo. Todos esses fatores são responsáveis por uma redução de 40% dos custos totais do processo de retificação (Fusse *et al.* 2005).

3.3.3 Os Problemas dos Fluidos de Corte

Os fluidos de corte são aplicados na usinagem dos materiais com o propósito de reduzir, através da lubrificação, as características dos processos tribológicos que estão sempre presentes na superfície de contato entre a peça e a ferramenta e também reduzir o calor na região de corte através da refrigeração (Pawlak *et al.* 2004).

Stanford *et al.* (2007) e Tawakoli *et al.* (2007) afirmam que os fluidos de corte também dificultam a corrosão da peça e da máquina ferramenta, transportam os cavacos gerados e promovem a limpeza do rebolo.

Devido à natureza do processo de retificação grandes quantidades de fluido de corte são aplicadas com o objetivo de reduzir as altas temperaturas oriundas do processo. Quando se aplica fluido de corte no processo de retificação, o tipo de refrigerante, sua composição, a posição do bocal e seu design e vazão são parâmetros que influenciam na produtividade, qualidade da peça e desgaste do rebolo (Brinksmeier *et al.* 1999).

Segundo Irani *et al.* (2005), uma vez usado, o fluido de corte contém pequenas partículas de materiais, como pedaços do rebolo, cavacos e outras impurezas. Em função disso, depois de certo tempo, por causa da contaminação, todo fluido deve ser trocado e descartado. Entretanto, esse descarte feito de forma indevida é prejudicial ao meio ambiente.

O principal problema decorrente do processo da usinagem, em particular da retificação, está relacionado ao uso de fluidos de corte. Isso se deve aos grandes danos que essas substâncias provocam à saúde das pessoas e ao meio-ambiente (BARTZ, 1998).

A causa maior desses problemas é a composição química dos fluidos de corte. Dessa forma, alguns componentes de sua composição são anticorrosivos, antiespumantes e biocidas.

Os biocidas são um dos aditivos mais perigosos aos operadores das máquinas (Hong & Broome, 2000).

Dessa forma, os principais problemas à saúde humana, decorrentes dos fluidos de corte são relatados no trabalho de Howell *et al.* (2006). Assim pode haver danos na pele, aparelho respiratório e até mesmo digestivo, devido aos metais pesados utilizados. O contato pela pele pode ocasionar alergias e dermatites dependendo do tipo de pele da pessoa e o tempo de exposição. Já os danos respiratórios e digestivos ocorrem, respectivamente, pela inspiração da névoa de fluido e por engolir pequenas partículas. Entretanto, Howes *et al.* (1991) concluíram que os principais problemas registrados são respiratórios e dermatológicos.

Além dos problemas ecológicos, existe a preocupação com o fator econômico, pois, conforme Byrne & Scholta (1993), a utilização dos fluidos de corte representa uma porção significativa dos gastos no processo de manufatura de uma peça, ou seja, em torno de 15 e 17%. Isso ocorre porque é necessária, além da compra, a preocupação com a manutenção do fluido para que ele não perca suas propriedades. Com isso, é conveniente monitorar sua temperatura, tratar a água que é adicionada, gastar energia com sistemas que o faça circular na máquina evitando ficar parado, controlar o pH entre outros.

Segundo Ebrell *et al.* (2000), apesar de os fluidos de corte trazerem muitos benefícios ao processo produtivo, às vezes são utilizados, tecnologicamente, de forma errônea com um índice muito alto de desperdício. Para que a lubrificação e refrigeração sejam eficientes, é importante que o fluido entre efetivamente na região de corte entre a peça e a ferramenta, reduzindo assim os gastos excessivos e os problemas que implicam em ofender o bem estar humano e ambiental.

Assim, Dhar *et al.* (2006) afirmam que, apesar das vantagens tecnológicas que os fluidos de corte promovem, ultimamente vêm sendo questionados os efeitos negativos que eles causam, ou seja, além das agressões ambientais, também problemas relacionados à saúde do trabalhador. Dessa forma, Sokovic & Mijanovic (2001) relataram que as empresas estão sendo forçadas a programar estratégias de refrigeração menos nocivas no processo de usinagem.

Tawakoli *et al.* (2007) mostram que uma das estratégias para promover diminuição do uso de fluidos de corte e otimizar o fluxo de fluido, situação que ocorre com o uso da mínima quantidade de lubrificante.

3.3.4 Otimização na aplicação dos fluidos de corte na retificação

Webster (1995) construíram um bocal otimizado que tem sido muito usado nos últimos anos devido a seu alto desempenho numa variedade de condições. A Figura 5 ilustra esse bocal.

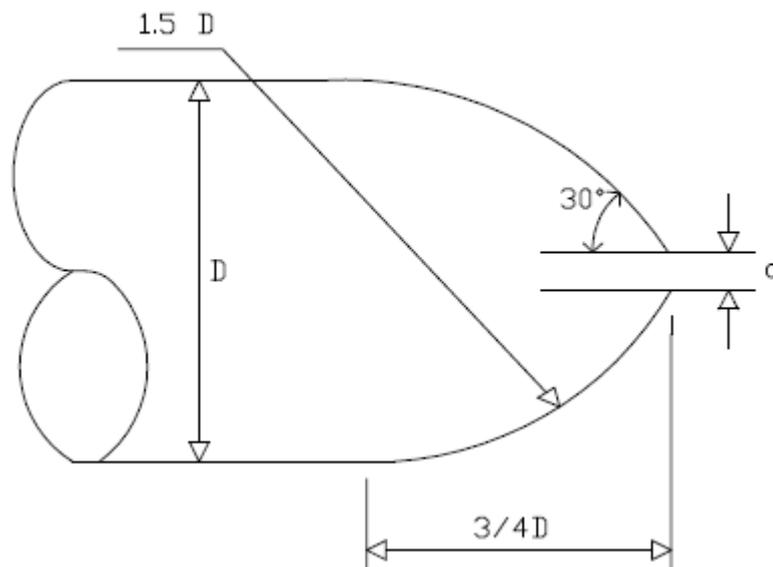


Figura 5: Bocal construído por Webster *et al.* (1995).

Ebbrell *et al.* (2000) estudaram, com base no colchão de ar que se forma na periferia do rebolo, diferentes posições para aplicação do jato de fluido de corte e verificaram que este influencia nos resultados do processo.

Outro sistema de otimização, estudado por Irani *et al.* (2005) foi o bocal de sapata, como demonstra a Figura 6. Segundo Salmon (1992), esse é o melhor método para a aplicação de fluido de corte na periferia do rebolo. Esse sistema trabalha pela entrada de fluido em uma cavidade que é expelido para a superfície do rebolo na sapata e carregado ao arco de corte. Essa técnica maximiza a quantidade de fluido passando na região de usinagem.

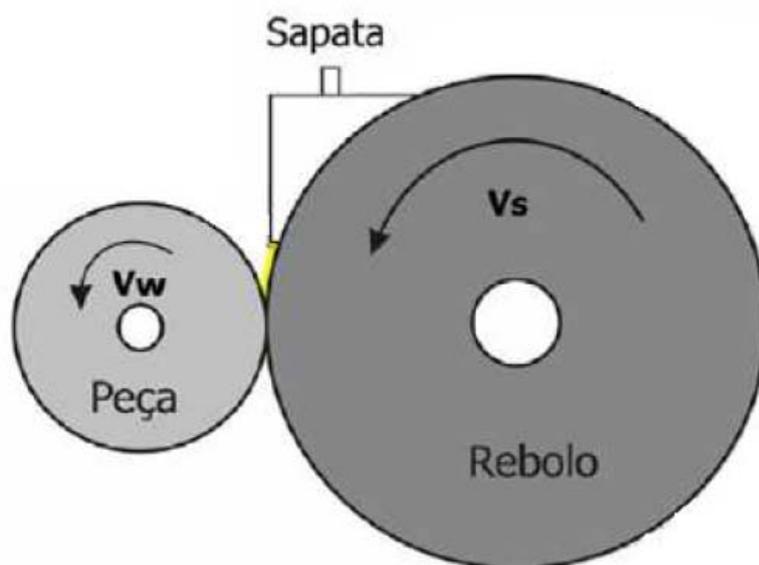


Figura 6: Bocal de sapata (IRANI *et al.* 2005 (modificado)).

Ramesh *et al.* (2001) desenvolveram um bocal de sapata com três orifícios ajustáveis para promover a aplicação de fluido de corte. O primeiro orifício elimina a cortina de ar na periferia do rebolo, criando um vácuo que permite grande fluxo de fluido de corte. O segundo orifício supria o fluido de corte que formava uma camada sobre a superfície de corte do rebolo. O terceiro, por sua vez, mandava o fluido direto a zona de corte. Com esse bocal, a força diminuiu 40 - 60%, a taxa de remoção aumentou e a qualidade superficial melhorou. Entretanto ocorreu um aumento no consumo de potência no eixo de acionamento do rebolo para acelerar o fluido, e a diminuição da força depende do material usinado.

3.4 Formas Alternativas de Lubri-Refrigeração No Processo de Retificação

Uma crescente atenção tem sido voltada para a cuidadosa seleção do fluido com o intuito de preservar o meio ambiente. Dessa forma, além dos requisitos tribológicos, os fluidos de corte devem satisfazer os critérios de proteção ambiental regidos pela norma internacional ISO 14000. Em função disso, os custos crescentes com o descarte desses fluidos, forçam as empresas a programar novas estratégias de refrigeração no processo de usinagem (Sokovic & Mijanovic, 2001).

Tecnologias para reduzir o consumo de fluido de corte estão disponíveis nos processos convencionais de usinagem, como por exemplo: torneamento, fresamento e furação, envolvendo a mínima quantidade de lubrificante ou, até mesmo a usinagem a seco, devido aos novos materiais das ferramentas e as condições de usinagem. Comparando-se aos processos de retificação, normalmente os processos convencionais apresentam uma região menor de contato entre a peça e a ferramenta (Diniz *et al.* 2008).

Na retificação, entretanto, com o maior atrito e maior região de contato, altas temperaturas são alcançadas e grandes quantidades de calor devem ser retiradas, caso contrário danos térmicos ocorrem na peça, os quais aceleram o desgaste do rebolo e deformações são induzidas na peça pela alta elevação da temperatura, resultando em pobre qualidade final das peças retificadas. Dessa forma grandes quantidades de fluido são usadas para remover grande parte do calor gerado (Shillor *et al.* 2004)

Assim as técnicas de retificação que busquem a eliminação ou ao menos a minimização do uso dos fluidos de retificação, devem manter a eficiência do processo (Sanchez *et al.* 2010).

Dineshi *et al.* (2010), definiram uma pirâmide das tecnologias em lubri-refrigerantes nos processos de usinagem. Em seu artigo a tecnologia atual disponível em grande escala são os fluidos de corte convencionais, usados em abundância. Já o MQL e a usinagem a seco são as condições mais favoráveis e desejáveis para reduzir custos e impactos ambientais.

Tawakoli *et al.* (2007) afirmaram que as estratégias para diminuição do uso de fluidos de corte e a busca por formas mais eficientes de lubri-refrigeração são: usar bocais especiais, otimizar o fluxo de fluido, usar a mínima quantidade de lubrificante, aumentar a vida do fluido, usar grafite, resfriamento criogênico, bio-fluidos e usinagem a seco.

3.5 A Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

Nos últimos anos, o uso de sistemas de lubri-refrigeração vem se tornando indesejável na produção. A rejeição para tais sistemas está no fato dos altos custos relacionados com o fornecimento e eliminação dos resíduos, bem como no aumento dos esforços adicionais aos sistemas, sendo estes a constante limpeza do chão da fábrica e os cuidados que o operador da máquina deve ter para evitar problemas de saúde (Novaski *et al.*, 1999).

Portanto, as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos e/ou lubrificantes na produção industrial. Além dos fatores acima citados, temos, dentre outros: custos operacionais da produção, questões ecológicas, exigências legais de conservação do meio ambiente e preservação da saúde do ser humano (Machado & Diniz, 2000).

Segundo Machado & Diniz, (2000), para que a utilização de fluidos de corte seja minimizada, duas técnicas têm sido intensamente experimentadas: o corte completamente sem fluido (corte a seco) e o corte com mínima quantidade de refrigeração (MQL), pelo qual uma mínima quantidade de óleo é pulverizada em um fluxo de ar comprimido.

Novaski *et al* (1999) comentaram que a usinagem a seco visa uma redução de custos, aumento de produtividade e atendimento aos requisitos ecológicos.

De acordo com Novaski *et al* (1999), com a não utilização de refrigerantes, suas funções passam também a não existir. Como principais funções encontram-se: redução do atrito (lubrificação), eliminação do calor (refrigeração) e auxílio ao transporte de cavacos (limpeza). Logo, com a falta de lubrificação, a camada de separação entre a ferramenta e o material não será mais suficientemente garantida e o atrito aumentará. Como consequência para a ferramenta tem-se o aumento do desgaste abrasivo e de adesão. Prevê-se também uma elevação da temperatura no processo. Com o aquecimento, os cavacos terão mais dificuldade para adquirir uma forma mais definida e podem soldar-se à ferramenta. A reduzida refrigeração influencia o comportamento térmico da máquina e, como consequência, a precisão dimensional e geométrica das peças.

Machado & Diniz, (2000) afirmam que à baixas velocidades de corte, a refrigeração é relativamente sem importância, enquanto a lubrificação é importante para reduzir o atrito portanto, um fluido a base de óleo deve ser utilizado. Em altas velocidades de corte, as condições não são favoráveis para a penetração do fluido de corte na interface para que ele exerça o papel de lubrificante. Nestas condições, a refrigeração torna-se mais importante e deve-se utilizar um fluido de corte à base de água.

Como lubrificante o fluido de corte age para reduzir a área de contato cavaco-ferramenta sua eficiência vai depender da sua habilidade em penetrar na interface cavaco-ferramenta, no pequeno espaço de tempo disponível, e de formar um filme, seja por ataque químico ou por adsorção física, com a resistência ao cisalhamento menor do que a resistência do material da interface.

A usinagem a seco necessita de novas soluções no sistema ferramenta-máquina-peça-processo, do seguinte modo (Novaski *et al*, 1999):

- Ferramenta:
 - ✓ Emprego de materiais mais adequados;
 - ✓ Adequação da geometria da ferramenta;
 - ✓ Revestimento.
- Máquina
 - ✓ Construção adequada;
 - ✓ Adequação às fontes de calor.
- Materiais
 - ✓ Materiais desenvolvidos para usinagem a seco;
 - ✓ Adição de elementos que melhoram a usinabilidade.
- Processo
 - ✓ Modificação dos parâmetros de usinagem;
 - ✓ Substituição de processos;
 - ✓ Usinagem quase a seco.

A usinagem a seco pode ser utilizada em alguns processos, mas quando não há a possibilidade de eliminação total da lubri-refrigeração, neste caso, utiliza-se o processo denominado quase refrigeração, com o emprego da técnica de Mínima Quantidade de Refrigeração (MQR) (Novaski *et al*, 1999).

A técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação pode ser entendida como uma pequena quantidade de óleo lubrificante misturada a um fluxo de ar comprimido, capaz de formar uma névoa que é direcionada à região de contato entre peça e ferramenta. As propriedades lubrificantes do óleo utilizado na MQL são responsáveis por reduzir o atrito, que por sua vez resulta numa redução do calor gerado, mantendo a ferramenta dentro de faixa de temperatura que não prejudique seu desempenho.

Embora a utilização de fluidos não seja completamente eliminada com esta técnica, os custos com limpeza e armazenamento de emulsões são diminuídos.

Existe uma série de diferentes sistemas no mercado para a utilização desta técnica e que podem ser divididos em dois grupos principais: um deles utiliza uma refrigeração por meio de uma aplicação externa, separada da ferramenta, e o outro refrigera a região de corte através de um módulo incorporado à ferramenta.

No sistema separado, o óleo é aspergido pelo ar, ou através de um sistema único, ou através de um sistema duplo, ou seja, o óleo sai de um reservatório e o ar de outro. A mistura

acontece próximo ao sistema aspersor. A formação do aerossol dá-se no aspersor através do princípio de Venturi.

O mercado oferece também outras variantes, a exemplo de um agregado externo com controle de emissão das gotas de óleo (Novaski *et al*, 1999).

Para a técnica da MQL, os materiais derivados de plantas estão cada vez sendo mais empregados. Estes óleos, se inalados com a formação do aerossol, causam um menor risco à saúde.

Em virtude deste risco o ambiente de névoa formado deve ser o menor possível. Como medida de precaução, alguns sistemas são oferecidos enclausurados na carenagem da máquina-ferramenta.

Também é possível instalar um sistema de aspiração na região de trabalho (Novaski *et al*, 1999).

Já segundo Heisel *et al* (1994), na técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL), a função de lubrificação é assegurada pelo óleo, e a de refrigeração, principalmente, pelo ar comprimido. Comparado com a lubri-refrigeração convencional, a técnica da MQL oferece inúmeras vantagens:

- A quantidade de lubri-refrigerante utilizado, em relação ao volume de peças usinadas, é muitas vezes menor do que no caso da lubri-refrigeração convencional por inundação.
- O lubri-refrigerante não é recuperado, eliminando assim a manutenção para reutilização e o tratamento para o descarte.
- A filtragem e a reciclagem do lubri-refrigerante para a manutenção das suas propriedades são eliminadas.
- As peças usinadas saem quase secas. Assim, uma posterior operação de lavagem é desnecessária em muitos casos.
- O baixo teor de óleo remanescente nos cavacos não é suficiente para uma reutilização.
- A aplicação de biocidas e conservantes pode ser eliminada, pois só a quantidade de lubri-refrigerante a ser utilizada em um turno ou em um dia de trabalho é colocado no reservatório do sistema de aplicação da mínima quantidade de lubrificante.

O uso da técnica de MQL em retificação ainda é uma área de pesquisa relativamente nova, e somente uns poucos pesquisadores têm estudado esta condição de lubri-refrigeração neste processo de usinagem. Os resultados destes estudos mostraram que com uma seleção

adequada do sistema de MQL e dos parâmetros de corte é possível obter um desempenho semelhante ao da lubri-refrigeração convencional por inundação, em termos de lubrificação, vida útil da ferramenta e acabamento superficial.

Tawakoli *et al.* (2010) mostraram em seus experimentos que quando se utiliza como condição de lubri-refrigeração a Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), a taxa de fluxo de óleo, a pressão do ar, a posição angular e a distância do bocal aplicador em relação à zona de contato peça-rebolo, são importantes parâmetros que influenciam no desempenho da operação de retificação, pois esses fatores são preponderantes na penetração efetiva da névoa de óleo na linha de corte. Constataram que o bico posicionado angularmente de 10 a 20° em relação à superfície da peça, proporciona uma redução considerável nas forças de retificação e na rugosidade.

3.5.1 Problemas Relacionados com a Mínima Quantidade de Lubrificação

A utilização da mínima quantidade de refrigeração, provoca alguns problemas relacionados com o meio ambiente e com a saúde do operador, tais como:

- Poluição ambiental: a pulverização levanta no ambiente de trabalho muitas partículas de óleo que exigem cuidados especiais, antes da implementação do sistema. É exigido uma máquina totalmente fechada, com guardas de proteção e um bom sistema de exaustão com controle de emissão de partículas (Machado *et al.*, 2000);

- Consumo: a aplicação do fluido por névoa é considerado sem retorno, ou seja, com perda total do fluido (Machado *et al.*, 2000);

- Ruído: na pulverização é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona intermitentemente durante todo o processo. Essas linhas de ar geram um ruído que geralmente ultrapassa os limites admissíveis para o ouvido humano (<80db).

Portanto, além de afetar a saúde do trabalhador, o ruído polui o ambiente e prejudica a comunicação (Machado *et al.*, 2000).

Deste modo, a mínima quantidade de refrigeração é um intermediário entre a usinagem com utilização de fluidos refrigerantes e a usinagem a seco. Neste contexto, pesquisas são realizadas no intuito de verificar os benefícios e danos causados por tal processo, viabilizando assim seu uso em escala industrial.

3.5.2 Fenômeno do empastamento das porosidades do rebolo

A energia na interface rebolo/peça gera um aumento na temperatura e uma maior tendência de aderência de partículas nos poros da ferramenta abrasiva. Com isso, ocorrerá uma elevação ainda maior de temperatura, causando danos térmicos como a queima superficial da peça, além de piorar o acabamento da peça e aumentar o desgaste do rebolo. Portanto, quanto menor a energia específica associada ao processo, menor a chance de danos ao trabalho (Salmon, 1992), (Wang *et al.* 2000)

Cameron *et al.*(2010) explicaram a fenomenologia do empastamento do rebolo da seguinte forma: quando o cavaco gerado no processo de retificação não é totalmente removido da zona de corte por meio do fluido refrigerante, esses cavacos alojam-se nos poros do rebolo, não deixando os fluidos entrarem perfeitamente na zona de corte e, dessa forma, dificultando ainda mais a limpeza. Esses cavacos alojados na superfície de corte do rebolo afetam a eficiência e qualidade da operação de retificação, pois aumentam a contribuição das deformações elástica e plástica na energia total de retificação. Assim, a energia inicial do processo irá subir e o calor na zona de corte também.

Detalhando um pouco mais este fenômeno, quando o processo de retificação se inicia, os cavacos vão sendo gerados e não são eliminados da zona de corte, mas sim, quando da utilização de MQL, misturam-se ao óleo do MQL e alojam-se nos poros do rebolo: Figura 7. À medida que a usinagem ocorre, essa proporção de cavacos vai aumentando até o momento em que ocorre o contato entre a peça e os cavacos alojados. Assim, haverá atrito entre eles, ocasionando apenas deformação elástica e plástica da peça, além do atrito maior, o que aumentará a potência de corte, a rugosidade e circularidade da peça e o desgaste do rebolo. O cavaco no poro do rebolo irá gerar reações nos grãos abrasivos e na peça. Com isso o, desgaste do rebolo se acentuará pelo desprendimento dos grãos. Adicionalmente, a peça será riscada pelo cavaco, piorando sua rugosidade.

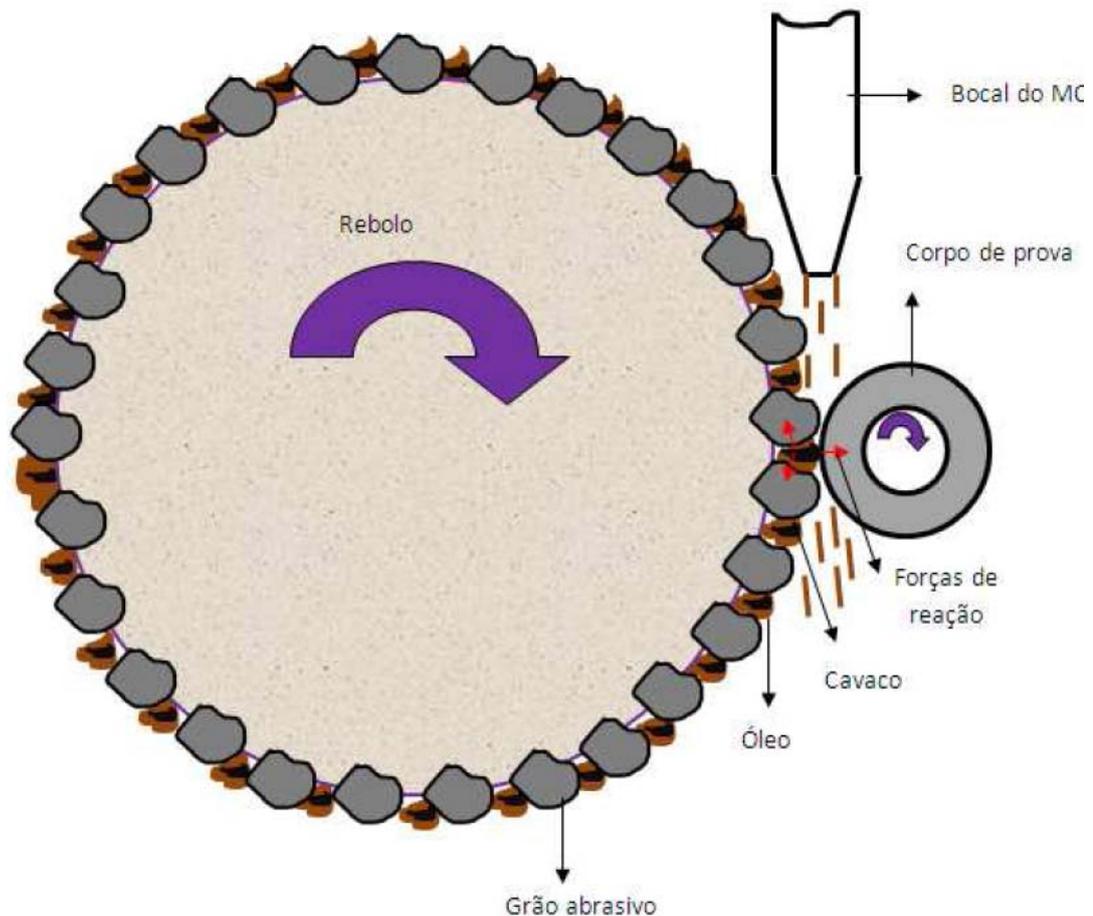


Figura 7: Fenômeno do empastamento do rebolo (Pereira *et al.* 2011).

Certas ligas são caracterizadas de difícil usinabilidade, como ligas de titânio, por exemplo, pois entopem os poros do rebolo facilmente quando partículas metálicas são comprimidas e aderidas nos espaços entre os grãos. Com altas taxas de remoção, o fenômeno é mais acentuado e alguns rebolos estão sujeitos a entupir mais e outros menos.

Duas maneiras de evitar o empastamento: usar um rebolo com uma estrutura aberta, o que pode aumentar a probabilidade da fratura do ligante; ou redressá-lo, o que aumenta o custo do processo.

A figura 8 apresenta uma pasta com tom cinza perceptível a olho nu na superfície de corte do rebolo, além da imagem feita no microscópio da superfície de corte de um rebolo entupido com cavacos (aumento de 100 X).

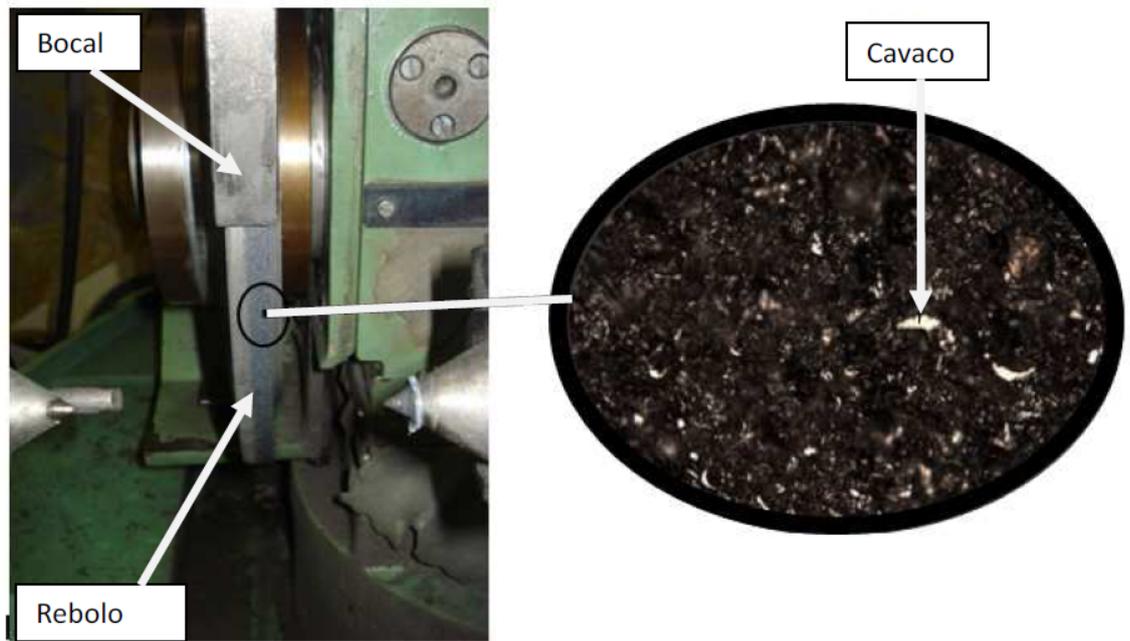


Figura 8: Rebolo empastado com cavacos aderidos (Pereira *et al.* 2011) (aumento de 100X).

3.6 Limpeza da superfície de corte de rebolos entupidos por cavacos

3.6.1 Limpeza a laser

Jackson *et al.* (2007) utilizaram um laser de dióxido de carbono para efetuar a limpeza da superfície de corte do rebolo. Segundo esses autores, o laser pode ser uma onda contínua ou pulsante. Como na Figura 9, o laser passa por uma lente convexa e irradia na superfície do rebolo uma grande quantidade de energia. Essa energia é capaz de cortar o rebolo, removendo grãos abrasivos e cavacos aderidos. Dessa forma, deve-se controlar a irradiação para que ela não danifique o rebolo, sendo dois parâmetros importantes a controlar: fluxo de energia do feixe e a duração do mesmo. Ajustando o foco, o fluxo de energia pode ser controlado. Controlar a duração do pulso do laser e sua frequência também pode ajudar a ajustar o nível de energia de irradiação.

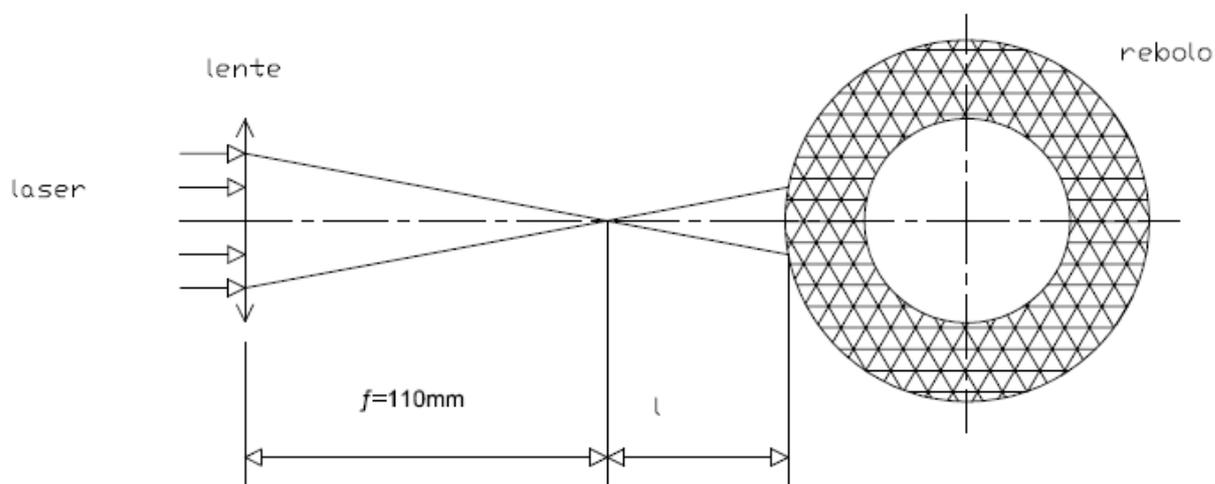


Figura 9: Limpeza a laser da superfície de corte do rebolo (JACKSON *et al.* 2007)

3.6.2 Limpeza por um sistema secundário de fluido de corte

Cameron *et al.* (2010) estudaram a retificação de aço com rebolo de alumina usando um sistema secundário de fluido de corte (composto por bomba e bocal de aplicação) de alta velocidade para a limpeza do rebolo, em adição ao sistema normal de fluido de corte. O sistema com a limpeza proporcionou menor queima da peça. A conclusão obtida foi que o cavaco aderido à superfície de corte do rebolo causava aumento das forças e queima da peça.

Webster (2001) descreveu uma avaliação em uma fábrica de cames, onde um jato separado de alta pressão foi adicionado ao processo de retificação para limpar o rebolo. Adicionando esse jato, foi possível o fabricante reduzir as inspeções de defeitos, economizando US\$ 300.000,00 por ano com mão-de-obra e consumo de materiais.

Com base no trabalho de Cameron *et al.* (2010) onde se estudou a influência do jato de fluido de corte para a limpeza sobre o processo de retificação, a Figura 10 mostra que a energia específica do processo para o jato usado a 120m/s é vista como sendo 33% menor em relação ao caso onde não se usou limpeza. Isso implicou em maior eficiência e menor ocorrência de queima.

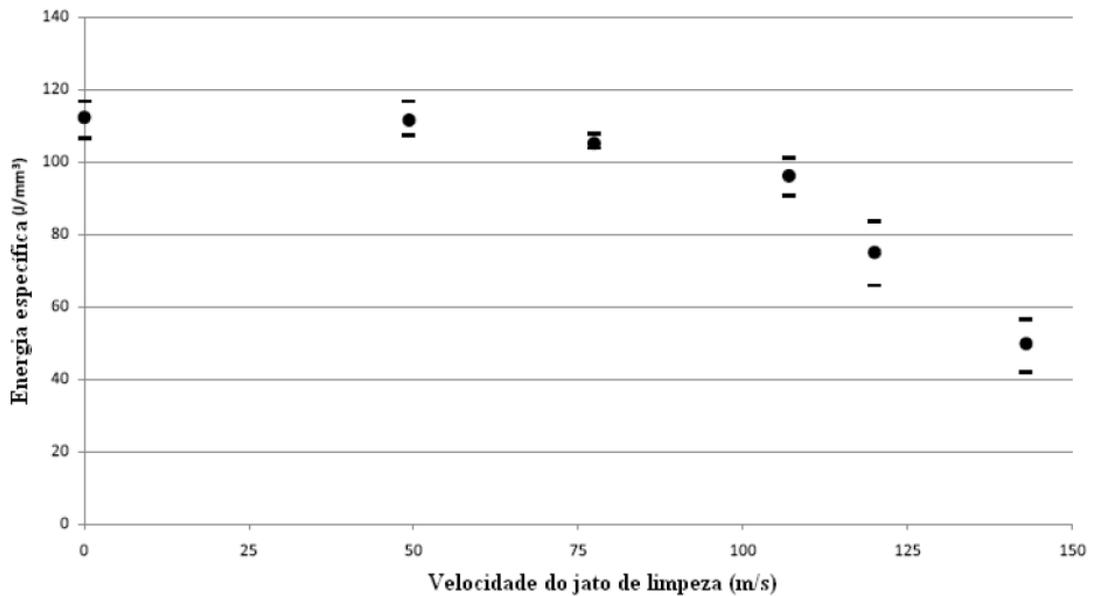


Figura 10: Influência da limpeza do rebolo no patamar de energia específica (CAMERON *et al.* (2010))

O sistema promoveu a limpeza da superfície de corte do rebolo, bem como o seu resfriamento. A vazão usada para o jato foi 17,8 litros/min e as orientações do bocal de limpeza foram: normal a superfície de corte, 26° e outra 90° (tangencialmente). Conforme estes autores, quando o bocal estava orientado normalmente, o fluido penetrava profundamente; quando tangencialmente, refletia. Assim, notou-se que houve maior redução da força tangencial com 26°, pois o fluido espalhava-se pela superfície do rebolo abrangendo uma área maior.

3.6.3 A utilização de jatos de ar comprimido para a limpeza do rebolo no processo de retificação

De acordo com Koenig & Arciszewski (1988), os rebolos de CBN (nitreto cúbico de boro) e diamantado são boas ferramentas abrasivas que mantêm a forma superficial quando submetidas a pequenos desgastes. Entretanto, por causa do fenômeno do entupimento dos poros desses rebolos (“clogging”), torna-se complicado manter a forma final da ferramenta. Em função disso, ocorre a queima na superfície da peça trabalhada e baixa qualidade superficial.

Conforme o trabalho realizado por Lee *et al.* (2002) na retificação de canais em peças, o jato de ar comprimido é uma alternativa para impedir o fenômeno descrito anteriormente, pois o ar incide no rebolo e retira todas as impurezas que aderiram à

ferramenta. Além disso, segundo Li & Seah (2003), no trabalho com torneamento, o ar comprimido promove certo efeito lubrificante que não deixa as impurezas direcionarem-se e aderirem à ferramenta, de acordo com a figura 11. Dessa forma, quanto menor for a pressão do ar, menor será seu efeito de limpeza.

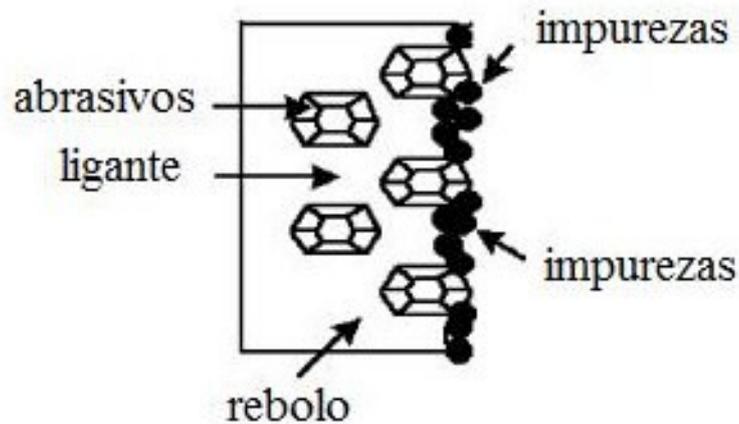


Figura 11: Retificação sem limpeza do rebolo (Lee et al. 2002, adaptado)

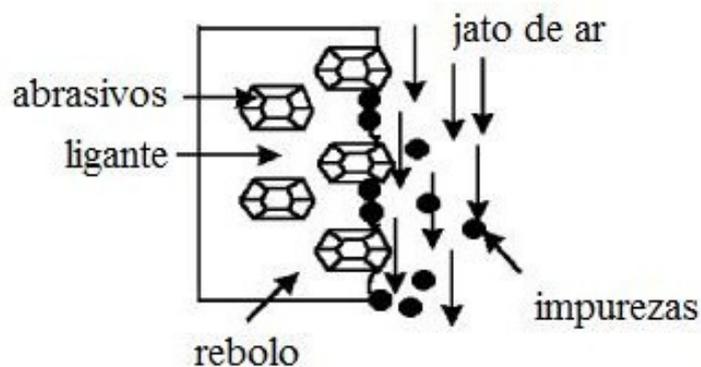


Figura 12: Retificação com limpeza do rebolo (Lee et al. 2002, adaptado)

Lee et al. (2002) apud Li & Seah (2003) concluíram que é conseguido um aumento na profundidade de corte decorrente da diminuição do desgaste da ferramenta, além do mais, é possível obter maior qualidade de forma geométrica e superficial, ou seja, melhores valores de rugosidade com a utilização de jatos de ar comprimido para a limpeza da ferramenta de corte, o rebolo. Nesse aspecto, a Figura 11 demonstra variação da profundidade do canal retificado com e sem a utilização dos jatos de ar comprimido durante o trabalho de Lee. Nota-se, pois, que com o uso de tais jatos conseguiu-se menor variação e maior precisão dimensional.

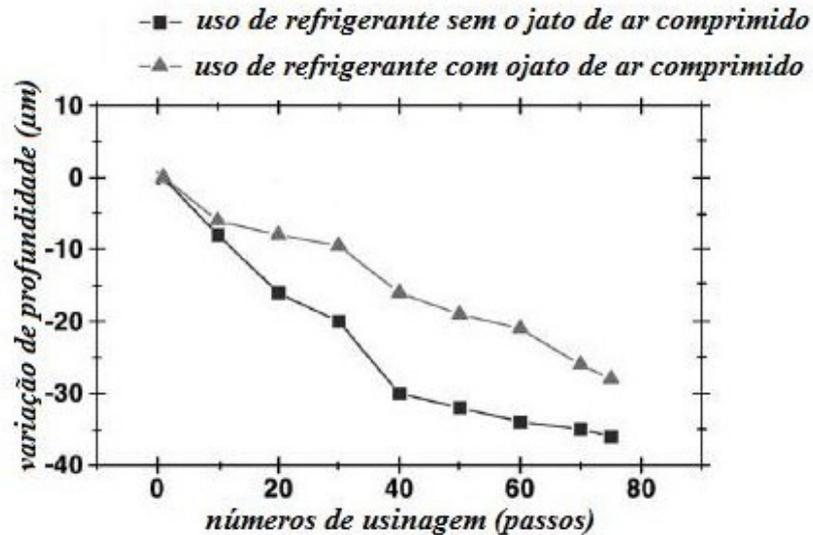


Figura 13: Variação da profundidade do canal retificado (Lee et. al. 2002, adaptado)

3.7 Variáveis de Saída no Processo de Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho

Diferentes materiais, como o aço e a cerâmica, proporcionam diferentes mecanismos de remoção de cavacos, os quais influenciam nas variáveis de saída também de forma diferente (Kramer, 2007). As variáveis de saída serão analisadas no experimento para melhor análise dos resultados, pois a interação singular entre o grão abrasivo e a peça possui uma influência direta na modelagem de tais variáveis, tais como o consumo de energia e rugosidade superficial (Hecker *et al.* 2007).

3.7.1 Força tangencial de corte

Segundo Li *et al.* (2002), a força na retificação é uma das mais importantes variáveis para avaliar o processo como um todo. Geralmente essa força é decomposta em três componentes: normal (F_n), tangencial (F_t) e uma componente ao longo da direção de avanço longitudinal, que não tem muita significância. A força tangencial afeta principalmente o consumo de energia e o tempo de vida do rebolo, o que acaba afetando também na temperatura e rugosidade superficial da peça trabalhada. A Figura 14 demonstra um esquema de retificação cilíndrica e as forças características.

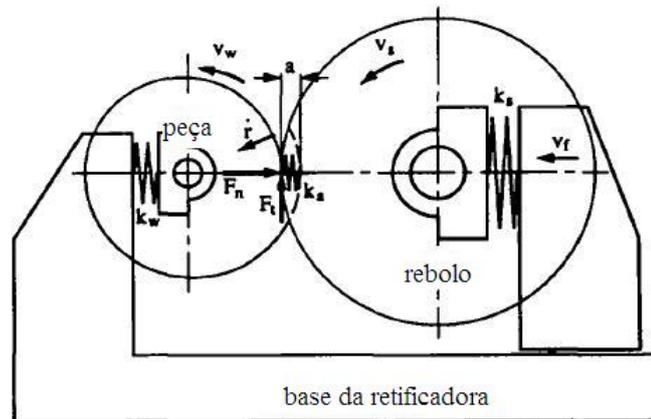


Figura 14: Representação da retificação cilíndrica externa de mergulho

Dessa forma, a força tangencial de corte em cada grão abrasivo durante o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho é expressa pela equação 12.

$$F_t = b \times h_{\max} \times K_S + \mu \times b^2 \times \pi \times \frac{K_n}{4} \quad (12)$$

Onde: b (mm) = largura média no topo dos grãos abrasivos;

K_S (N/mm²) = pressão específica de corte;

μ = coeficiente de atrito entre grão e peça;

K_n (N/mm²) = tensão de escoamento do material.

Através da equação 12 pode-se notar que a espessura máxima do cavaco e a largura média no topo dos grãos abrasivos são as principais variáveis que afetam o valor da força tangencial de corte. A espessura máxima do cavaco pode ser controlada pelas condições de usinagem, e a largura média dos topos dos grãos abrasivos está diretamente relacionada à capacidade do ligante do rebolo de reter os grãos abrasivos na superfície de corte por mais tempo.

Segundo Li *et al.* (2002), o tamanho do grão abrasivo e a resistência do ligante do rebolo é de fundamental importância no aumento das forças de corte durante a retificação, pois, para uma determinada profundidade de corte, a diminuição do tamanho do grão promove aumento na força de retificação.

Outro fator que influencia o aumento dessa variável, tanto no trabalho com aço como cerâmica é a diminuição na velocidade de corte, de acordo com Heinzl & Bleil (2007).

Com isso, a força tangencial de corte está, pois, ligada ao fenômeno da remoção do material, desgaste da ferramenta abrasiva, temperatura e integridade superficial da peça retificada (Liang, 1992).

3.7.2 Energia Específica (u_c)

De acordo com Kannapan & Malkin (1972) *apud* Tönshoff *et al.* (1999), a energia específica de retificação é a quantidade de trabalho necessária para separar um volume de material do seu substrato, englobando a energia de formação do cavaco, a energia de fricção entre os grãos abrasivos e a peça e energia dissipada na deformação plástica.

O processo de retificação envolve elevada concentração de energia na interface peça/ferramenta o que promove elevadas temperaturas. Em função disso, danos térmicos são causados à peça e também ao rebolo que acaba se desgastando mais rapidamente. Salmon (1992), ainda confirma que grande quantidade de energia específica está associada a elevados gradientes térmicos, tensão residual e integridade metalúrgica baixa.

Dessa forma, com base no trabalho de Heinzl & Bleil (2007), a energia específica é também uma variável importante para avaliar o processo de retificação. Está, relacionada com os parâmetros de retificação através da seguinte equação:

$$u_c = \frac{F_t V_s}{\pi d_w V_f b} \quad (13)$$

Onde:

V_s é a velocidade corte

b é a largura de retificação

V_f é a velocidade de avanço

d_w é o diâmetro da peça.

Assim, o aumento da energia específica, o que implica no aumento da temperatura, está relacionado com as condições de retificação, como o tipo de abrasivo, aplicação de fluidos para lubri-refrigeração, profundidade de corte e velocidades de corte e da peça.

O mecanismo de remoção de material na retificação de cerâmica, em particular, pode ser classificado em dois modos: fratura frágil e dúctil (deformação plástica). Nesse caso, a relação inversa entre energia específica e profundidade de corte está associada ao modo dúctil, pois, conforme diminui o parâmetro espessura equivalente de corte, há a transição do modo frágil para o dúctil e a energia para produção do cavaco corresponderá somente à deformação plástica (Hwang *et al.* 2000), como representado na Figura 15.

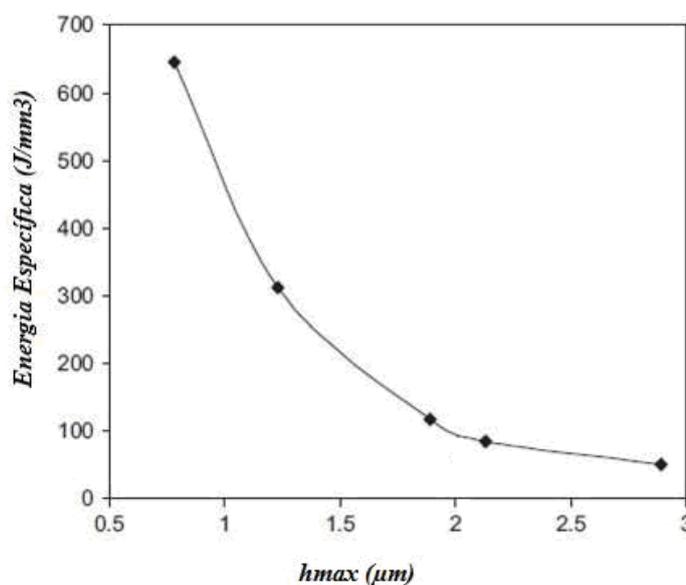


Figura 15: Redução brusca da energia de retificação com aumento da espessura máxima teórica do cavaco (Agarwal & Rao, 2008)

A energia específica no processo de retificação é da ordem de uma a duas vezes maior que a energia associada aos outros processos de usinagem. Já a energia necessária para retificar alumina é uma ordem de magnitude menor do que para os metais, em especial no regime dúctil que é dezenas de vezes maior que no modo frágil, segundo Liang (1992).

3.7.3 Emissão Acústica (EA)

A emissão acústica é definida como uma onda elástica transiente gerada por uma rápida liberação de energia de uma fonte localizada no material quando submetido a um estado de tensão. A energia liberada está associada a uma abrupta redistribuição de tensão e

com isso uma onda é propagada pelo material (Ravindra *et al.* 1997). Na maioria das vezes, a emissão acústica está ligada à interação entre o grão do rebolo e a superfície do material.

A aplicação da emissão acústica na retificação é estudada desde a década de 80. Em pesquisa realizada, determinou-se um eficiente método para detecção de contato entre o rebolo e a peça, ou entre o rebolo e o dressador, através do valor da raiz média quadrática da emissão acústica.

Os sensores de emissão acústica têm provado ser superiores em sua eficiência a outros sensores no processo de retificação, tais como os sensores de força e de corrente. Além disso, o custo do sensor de emissão acústica é muito menor e mais fácil de posicioná-lo no processo.

Sensores de emissão acústica têm sido utilizados na detecção de contato entre o rebolo e dressador, no monitoramento da profundidade de dressagem, no monitoramento da ponta do dressador (Webster *et al.*, 1995) e no diagnóstico de falhas na dressagem (Lee *et al.*, 2002).

O uso da monitoração dos processos de usinagem tem sido feito para providenciar maior qualidade do produto (Tönshoff *et al.* 1999). A emissão acústica tornou-se uma boa opção, pois todos os materiais emitem sons a alta frequência quando submetidos a um esforço ou quando são deformados ou fraturados. Com isso, a vantagem dessa técnica é que o processo pode ser monitorado instantaneamente.

Com base nisso, Wang *et al.* (2001) relatam que esta variável está intimamente relacionada ao estado do processo de retificação e às condições superficiais da ferramenta abrasiva e da peça que está sendo trabalhada. Além do mais, segundo Kramer (2007), como o modo de remoção dos materiais é diferente, isso é a principal causa dos sinais de emissão acústica. Esses sinais podem ser modulados por drásticas mudanças no mecanismo de remoção do material como no caso das cerâmicas onde pode haver a transição entre os modos frágil e dúctil. Assim, com o emprego da emissão acústica, pode-se analisar a interface peça/ferramenta, o desgaste do rebolo, o corte do material, e também a integridade superficial. Além do mais, Webster *et al.* (1996) enfatizaram o emprego dessa variável na verificação da dressagem e dos danos térmicos.

A existência da relação da emissão acústica com a primeira e segunda zona de centelhamento associada com a grande energia da deformação plástica. A EA é também uma função da velocidade e da dureza do material usinado, a qual influencia na remoção e morfologia de formação do cavaco, implicando na maior emissão desses sinais.

Entretanto, segundo Lee *et al.* (2001), o principal prejuízo encontrado em tal técnica, está na sensível dependência da localização do sensor, uma vez que quanto mais próximo o sensor do ponto de retificação, melhor a sensibilidade e a leitura dos dados. Usou em seu trabalho um transdutor pizoelétrico para detectar as ondas de emissão acústica, e a influência negativa dos barulhos do rebolo e da aplicação de fluido na captura desses sinais.

3.7.4 Desvio de Circularidade

Circularidade é a condição pela qual qualquer círculo deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos, distantes no valor da tolerância especificada.

O erro de circularidade é definido como qualquer diferença entre a peça usinada e a projetada com tolerâncias especificadas (Jedrzejewski & Modrzejcky, 1997) e é definido em função da funcionalidade da peça que está sendo usinada.

Dessa forma, segundo Holesovsky & Hrala (2004) *apud* Moerlin *et al.* (2008), a precisão de uma peça trabalhada na retificação é predita pela precisão do equipamento de produção, a magnitude de desgaste do rebolo, a rigidez do conjunto máquina/peça/ferramenta/sistema de fixação, a taxa de remoção do material e energia específica. Além do mais, os problemas aumentam com o aumento das vibrações. Com base nisso, quanto maior o calor na zona de corte, maior dilatação e deformações térmicas e então ocorrerá na peça um aumento nos erros geométricos, especialmente no erro de circularidade (Demeter & Hockenberger, 1997). Para que isso seja evitado, é conveniente, pois, o uso de refrigerantes no processo.

Segundo Chen *et al* (2002) os desvios de circularidade estão relacionados a rotações imperfeitas do conjunto peça-ferramenta, a vibrações associadas ao desbalanceamento do rebolo, a ações de corte errôneas, a lubrificação inadequada, ao desgaste da ferramenta e a defeitos em componentes da máquina.

O monitoramento dos desvios de circularidade é fundamental para que se consiga uma análise de tolerância bastante precisa de peças com geometria circular. Os erros de circularidade ocasionados pelo processo durante a usinagem, estão relacionados às condições de retificação, aos danos térmicos que possam ter ocorrido, às solicitações mecânicas e às condições de aplicação do fluido de corte. O erro de circularidade expressa qual o erro de

forma final da peça usinada, ou seja, indica o estado cilíndrico final da peça, fator muito importante nos processos de retificação de precisão (Fusse *et al.*, 2005).

3.7.5 Rugosidade

A qualidade da superfície gerada na retificação de qualquer material determina muitas características da peça trabalhada como a mínima tolerância, a eficiência na lubrificação, a vida útil, propriedades funcionais, resistência à fadiga e corrosão, entre outras. Dessa forma, um parâmetro típico que tem sido utilizado para quantificar a qualidade topográfica da superfície é a rugosidade superficial (Hecker & Liang, 2003).

Assim, Marinescu *et al.* (1998) define a rugosidade como o desvio da forma geométrica ideal da superfície. O parâmetro de rugosidade mais utilizado é a média aritmética (*Ra*) e é definido como a média aritmética do desvio do perfil de rugosidade em relação à linha média (Mayer & Fang, 1995).

Weck *et al.* (2001) afirmaram que a qualidade superficial depende principalmente dos aspectos tecnológicos como o rebolo, parâmetros de dressagem, taxa de remoção de material e o uso de lubri-refrigerantes que reduzem as forças e energia. Bigerelle *et al.* (2008) relataram que a redução da rugosidade superficial está diretamente relacionada com o tamanho e a forma do grão abrasivo do rebolo, onde quanto mais arestas de corte em contato com a superfície, melhor a rugosidade. A natureza do ligante também influencia nessa variável, segundo Demirci *et al.* (2008).

Já para Hecker & Liang (2003), a rugosidade é uma função das condições cinemáticas do processo (profundidade de corte, velocidade de corte e da peça) e também do material usinado. Assim, uma maior velocidade melhora a qualidade superficial, pois haverá uma maior quantidade de grão, em contato com a peça. Entretanto, para Huang *et al.* (2003), a velocidade de corte não afeta significativamente a rugosidade, quando o modo de remoção dominante é por fratura frágil no caso das cerâmicas.

Além disso, Ramesh & Huang (2003) dizem que o tempo de centelhamento, e o tipo de dressagem melhoram a qualidade superficial porque há uma fragmentação nos cavacos.

3.7.6 Desgaste diametral do rebolo

Durante a retificação de uma peça existem três formas de desgaste da ferramenta abrasiva: pelo atrito entre o grão abrasivo e a peça; pela fratura do grão; pela fratura do ligante. Essas formas de desgaste são decorrentes das solicitações mecânicas a que o rebolo é submetido e também da deterioração térmica do próprio ligante (Liao *et al.* 2000).

O desempenho do rebolo em contraposição ao seu desgaste pode ser medida por meio da relação “G”. Esta relação é um parâmetro importante porque mantém certa ligação com os custos do rebolo em muitas operações. Por esse motivo, rebolos que apresentam relação “G” alta produzem mais e desgastam-se menos (Krueger *et al.* 2000).

Assim, de acordo com Marinescu *et al.* (2004), a relação “G” é uma medida de quanto volume de material é removido da peça por unidade de volume de rebolo gasto:

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (14)$$

Onde: V_w - volume de material removido e V_s - volume de rebolo gasto.

Segundo Choi *et al.* (2008), as mudanças nas arestas de corte da superfície de corte da ferramenta abrasiva afetam o desempenho da retificação. Com isso, Marinescu *et al.* (2004) relataram que o desgaste do rebolo durante a retificação influencia, entre outros, nos seguintes aspectos do processo:

Erro na profundidade de corte;

Erro na dimensão final da peça;

Aumento das forças características do processo;

Aumento ou decréscimo da rugosidade;

Mudança no número de arestas de corte efetivas;

Nova dressagem do rebolo, ocasionando perdas na superfície da ferramenta, desgaste da ferramenta de dressagem e também gasto de tempo.

Entretanto, alguns fatores que influenciam o desgaste da ferramenta abrasiva são citados em alguns trabalhos. Choi *et al.* (2008) afirmaram em seu artigo que a relação G está primariamente relacionada com a espessura equivalente de corte, onde o aumento dessa espessura promove diminuição do parâmetro G. Além do mais, a maior eficiência do grão abrasivo é conseguida por meio de uma maior velocidade de corte e também pela aplicação de lubri-refrigeração.

3.7.7 Microscopia Eletrônica de Varredura

Segundo Obikawa *et al* (2009), a integridade de superfícies usinadas vem apresentando crescente importância nos dias atuais. Isso decorre do fato do grande desempenho que é requerido das partes mecânicas de muitas máquinas produzidas.

Os principais danos nos que ocorrem nos materiais durante a retificação são superficiais e subsuperficiais como microtrincas, transformação de fase, tensão residual entre outras coisas (Agarwal & Rao, 2008), como já dito. Segundo Chen *et al.* (2000), após a retificação é de fundamental importância que seja baixa a ocorrência de tensão residual. Entretanto, se for alta, ocorrerá o surgimento de trincas que comprometerão a vida útil da peça fabricada em função da vulnerabilidade à corrosão e baixas condições de resistência à fadiga. Ainda segundo esse autor, a tensão residual surge, principalmente, pela contração e compressão da peça durante sua usinagem.

Baseado nisso e segundo Marinescu *et al.* (1998), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica para investigar a estrutura superficial das superfícies fraturadas; e também detectar falha e poros. Esta análise do material é feita após este ter passado pelo processo de usinagem. Assim, é possível analisar as solicitações mecânicas e térmicas que a peça sofreu durante o processo e, então, averiguar sua integridade superficial.

Conforme o trabalho do Salmon (1992), na microscopia eletrônica de varredura é usado o bombardeamento de elétrons na superfície do material para sua representação precisa. Dessa forma, Marinescu *et al.* (1998) explicaram o funcionamento dessa técnica, onde um fino feixe de elétrons (0,01 μm de diâmetro) varre linearmente a superfície do material. O impacto dos elétrons primários do feixe faz com que os elétrons secundários da superfície do material sejam emitidos e captados. Assim, esses elétrons secundários formam a imagem, onde as regiões da superfície do material, que estão mais baixas, irradiam menos elétrons e as mais altas irradiam mais. Já a resolução do microscópio eletrônico de varredura é em torno de 0,01 μm .

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os equipamentos e materiais empregados nos experimentos, assim como os procedimentos executados e parâmetros de entrada adotados no desenvolvimento do trabalho. Também são descritas as medições e análise das variáveis de saída e das demais variáveis, além dos definidos, para determinação das condições de usinagem da cerâmica, e também os parâmetros necessários: as melhores velocidades de corte e das peças, os melhores valores de velocidades de vazão do sistema de mínima quantidade de lubrificante, avanços de corte, vazão e pressão do bocal de limpeza e as melhores espessuras equivalentes de corte.

A retificação dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia - UNESP - *campus* Bauru. Os resultados de rugosidade, circularidade e desgaste diametral do rebolo, obtidos após a experimentação, foram analisados nos laboratórios da UNESP, *campus* de Bauru. Em relação à aplicação da técnica MQL, foi utilizado como acessório um aplicador *Accu-lube 79053D*, para a realização da mistura do ar e do lubrificante nas respectivas vazões. Para a aplicação do ar comprimido na limpeza do rebolo foi usado um sistema desenvolvido pelos próprios alunos e professores do Laboratório de Usinagem por Abrasão da faculdade.

4.1 Equipamentos Utilizados

Nesse tópico serão apresentados os equipamentos necessários à realização desse projeto, bem como os materiais utilizados e também os métodos de análise e verificação das variáveis de saída para que fossem obtidos os melhores resultados possíveis.

4.1.1 Retificadora cilíndrica externa

Os experimentos foram realizados na retificadora cilíndrica CNC fabricada pela empresa SULMECÂNICA, modelo RUAP515H equipada com comando numérico computadorizado CNC da Fagor para o acionamento do eixo “X”. Utilizaram-se dois programas CNC; um para a usinagem dos corpos de prova e outro para a impressão do rebolo desgastado. A retificadora possui vedação com cortinas plásticas e placas de policarbonato para minimizar a perda de fluido para o ambiente. A retificadora pode ser vista na Figura 16. O programa CNC usado, mostrado na tabela 2.



Figura 16: Retificadora cilíndrica universal, CNC.

Tabela 2: Programa CNC para usinagem do corpo de prova

| Linh a | funçã o | programa | Descrição |
|-----------|------------|-----------------|---|
| 000 | X | 500000 | Coordenada inicial da Máquina |
| 001 | G | 0071 | Avanço rápido |
| 002 | X | 3482400 | Coordenada de toque na peça, acrescida de 0.2mm |
| 003 | G | 91 | Programação incremental |
| 005 | G | 61 | Condição de trabalho para velocidades de avanço de 0,1mm/min. |
| 006 | M | 01 | Condição de parada |
| 007 | G | 01.71 | Aproximação lenta |
| 017 | F | 00001 | Taxa de alimentação do eixo |
| 018 | G | 04.02.00 | Normalização |
| 019 | X | -0.2000 | |
| 020 | G | 04.05.00 | Tempo de "spark out" |
| 021 | X | -0.1000 | Incremento (usinagem da peça) |
| 022 | G | 04.05.00 | Tempo de "spark out" |
| 023 | X | -0.1000 | Incremento (uminagem da peça) |
| 027 | G | 25 020.023.4 | "Função looping" |
| 028 | N | 2 | |
| 029 | G | 04.05.00 | Tempo de "spark out" |
| 030 | X | 2.0000 | Incremento (saída da ferramenta) |
| 031 | M | 02 | Desliga a "peça" |
| 032 | M | 30 | Finalização do programa |

O programa para a marcação do desgaste do rebolo é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Programa CNC para Usinagem do corpo de prova para medição de desgaste de Rebolo.

| Linha | função | programa | Descrição |
|-------|--------|------------|---|
| 033 | X | 550000 | Coordenada inicial da Máquina |
| 034 | G | 00.71 | Avanço rápido |
| 035 | X | 348.6440 | Coordenada de toque na peça, acrescida de 0.2mm |
| 036 | G | 91 | Programação incremental |
| 037 | G | 61 | Condição de trabalho para velocidades de avanço de 0,1mm/min. |
| 038 | M | 01 | Condição de parada |
| 039 | G | 01.71 | Aproximação lenta |
| 040 | F | 00001 | Taxa de alimentação do eixo |
| 041 | G | 04.02.00 | Tempo de "spark out" |
| 042 | X | -0.1000 | Incremento (usinagem da peça) |
| 043 | G | 25 | "Função looping" |
| 044 | N | 040.042.10 | |
| 045 | G | 04.08.00 | Tempo de "spark out" |
| 046 | X | 0.5000 | Incremento (saída da ferramenta) |
| 047 | M | 02 | Desliga a "peça" |
| 048 | M | 30 | Finalização do programa |

4.1.2 Corpos de Prova

Os corpos de prova foram adquiridos por intermédio da empresa “Máquinas Agrícolas Jacto S/A”. Eles são constituídos, segundo informação da empresa, de uma alumina comercial, composta por 96% de óxido de alumínio, 4% de outros óxidos (SiO₂, CaO e MgO) e fundentes. A densidade aparente deste material é de 3,7 g/cm³.

A escolha da alumina como material do corpo de prova deve-se ao fato de ser um material universal e comumente empregada no meio industrial.

A Figura 17 ilustra o formato (arruela) e as dimensões (diâmetros e espessura) dos corpos de prova que foram usados nesta pesquisa.

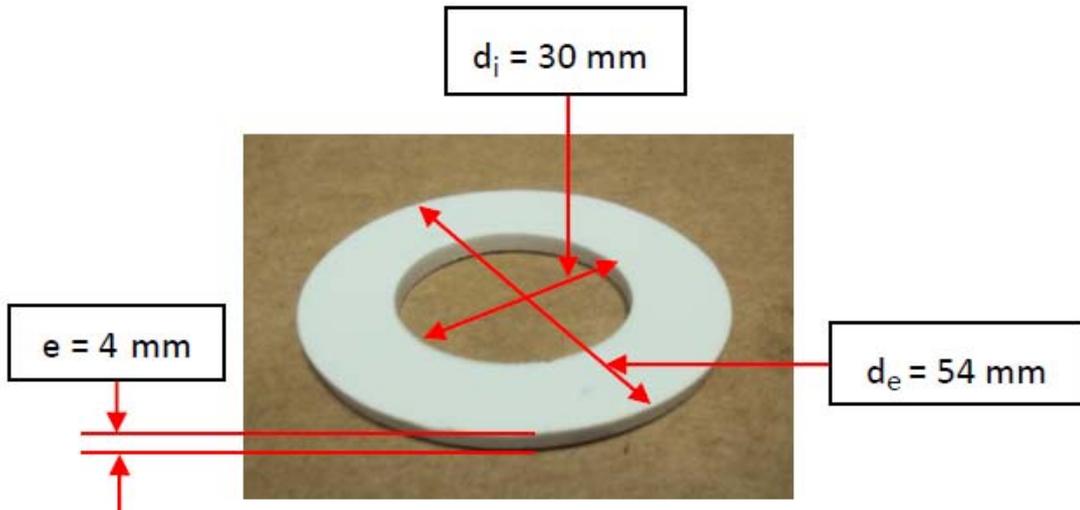


Figura 17: Corpo de prova

4.1.2.1 Mandril para fixação dos corpos-de-prova

O corpo de prova foi preso por um mandril, Figura 18, o qual posteriormente foi fixado entre pontas na retificadora cilíndrica para possibilitar sua usinagem.

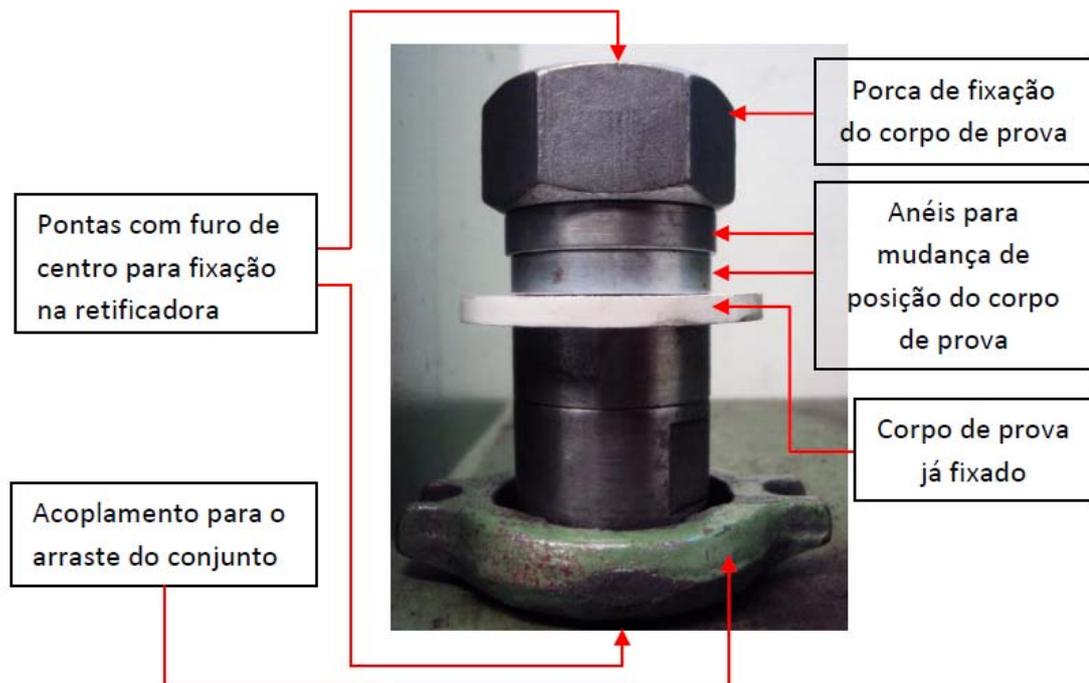


Figura 18: Mandril para a fixação do corpo de prova e seus componentes

4.1.3 Rebolo Utilizado

O rebolo utilizado para a realização dos ensaios foi o rebolo diamantado, de liga resinóide, D140 N100V com dimensões de 350mm (diâmetro externo) x 15mm (largura) x 5mm (camada) e diâmetro interno de 125mm. A Figura 19 mostra o rebolo diamantado da Dinser Ferramentas Diamantadas.



Figura 19: Rebolo diamantado da Dinser Ferramentas Diamantadas

4.1.4 Dressador

O dressador utilizado nesse experimento foi do tipo conglomerado. Ele e suas dimensões são mostrados na Figura 20. Esse tipo de dressador foi escolhido, pois, diferentemente do dressador de ponta única, a velocidade da mesa não interfere nos parâmetros de dressagem, o que torna mais fácil obter parâmetros de dressagem constantes.

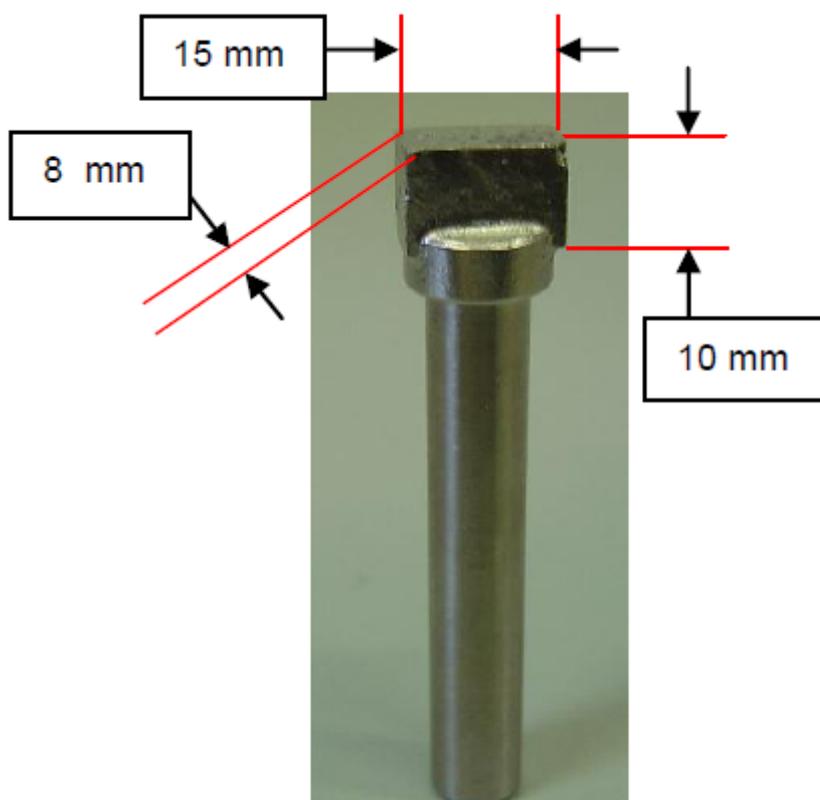


Figura 20: Dressador conglomerado

4.1.5 O sistema de refrigeração convencional

O sistema de refrigeração convencional utilizado é o mesmo comumente usado no meio industrial e, compõe-se de: caixa reservatória de fluido com capacidade de 80 litros, bomba de sucção, mangueiras, bocais aplicadores e o fluido de corte (óleo solúvel, concentrado, semi-sintético, ME-I), numa emulsão de 5% em água.

Este lubrificante contém na sua composição: anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, tensocíativos não iônicos, alcanolomidas, entre outros.

4.1.5.1 Medição da concentração da emulsão

As medições da concentração da emulsão, na refrigeração convencional, foram verificadas periodicamente através do refratômetro portátil do fabricante *ATAGO* modelo N-1E, na concentração de 2,5%.

4.1.6 O sistema MQL

O sistema MQL é composto basicamente de: compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador (equipamento de MQL) e bocal projetado para a utilização de MQL na retificação. O equipamento de mínima quantidade de lubrificante permite uma fina regulagem do volume de lubrificante/ar separadamente, por meio de um registro tipo agulha, atomizando-o em um fluxo de ar à pressão constante de $6,5 \text{ kgf/cm}^2$ aproximadamente.

A Figura 21 apresenta a unidade de controle do equipamento de MQL, onde são feitas a dosagem do óleo lubrificante e a regulagem da vazão de ar comprimido. Na Figura 22 encontra-se o bocal desenvolvido e utilizado na experimentação da técnica MQL no processo de retificação. O modelo permite uma excelente formação de névoa.

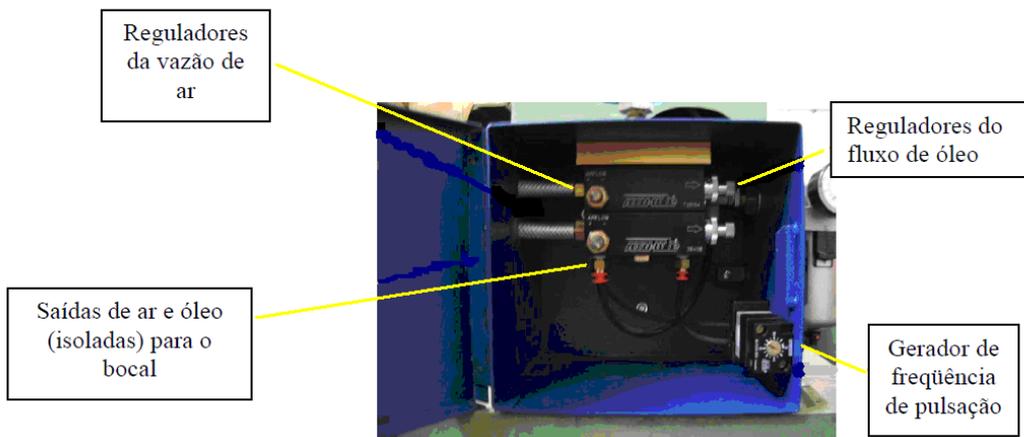


Figura 21: Unidade de controle do MQL

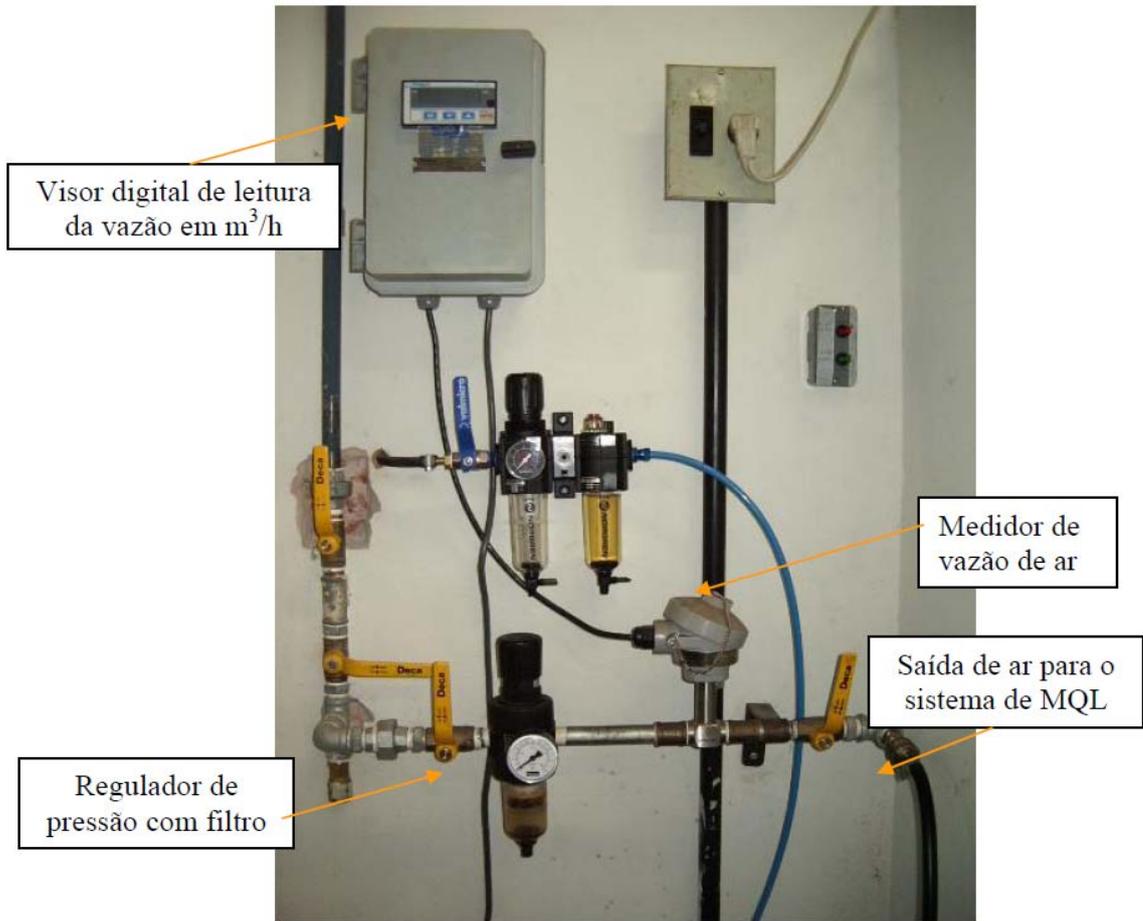


Figura 23: Sistema de ar comprimido para o MQL

O fluido de corte utilizado no sistema MQL é um fluido próprio para utilizações em altas pressões devido aos seus aditivos, Accu-Lube LB 1000 do fabricante ITW Chemical Products Ltda., sem diluição, que foi testada e aplicada em outras pesquisas realizadas neste laboratório. Este é um óleo vegetal biodegradável que contém também antioxidantes como aditivos.

4.1.7 Sistema de limpeza com ar comprimido

Na Figura 24 pode ser visto o sistema utilizado para a limpeza da superfície de corte do rebolo, com filtro e um medidor de pressão e vazão.



Figura 24: Sistema de ar comprimido para a limpeza de rebolo

Na figura 25 está representado o bocal com o conjunto de peças utilizadas na fixação, regulagem de posicionamento e também para medição do ângulo de inclinação que determinará o próprio ângulo de incidência do jato de ar comprimido na superfície de corte do rebolo, já que a determinação do melhor ângulo é uma questão fundamental nesse trabalho.



Figura 25: Demonstração das partes funcionais do bocal para limpeza do rebolo

Na Figura 26 está ilustrada ângulos de incidência do jato de ar comprimido.

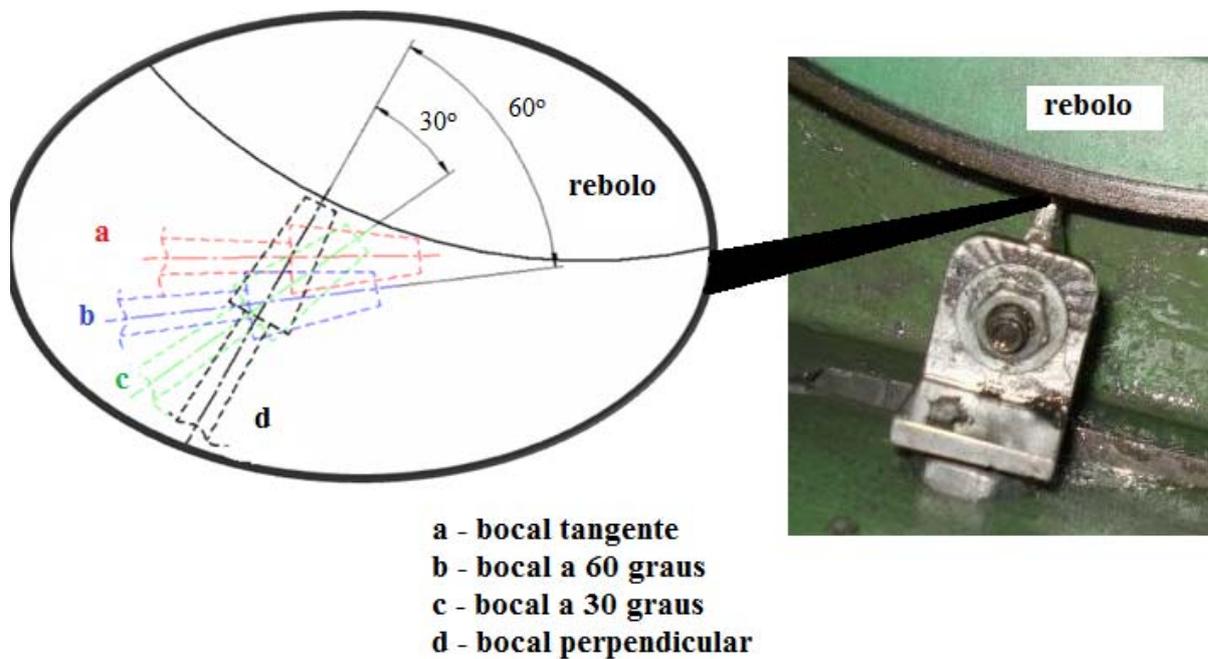


Figura 26: Detalhe dos ângulos de incidência do jato de ar comprimido

Na Figura 27 esta esquematizada a fixação do bocal de limpeza.

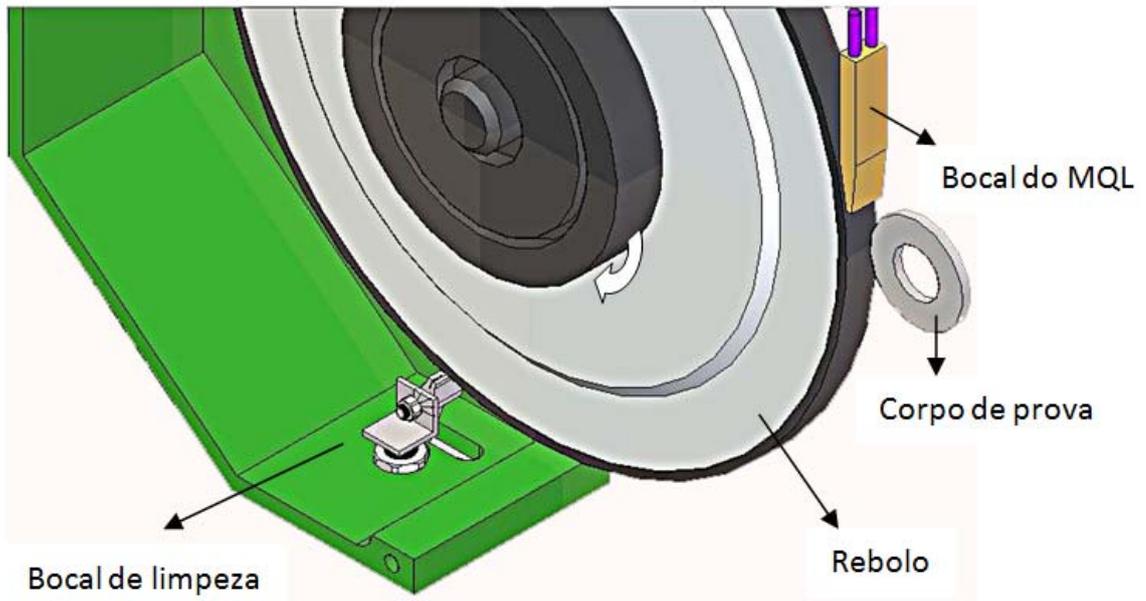


Figura 27: Fixação do bocal de limpeza

Na Figura 28 pode ser visto o detalhe de posicionamento de dois bocais a 90°, com uma distância mínima da superfície do rebolo.

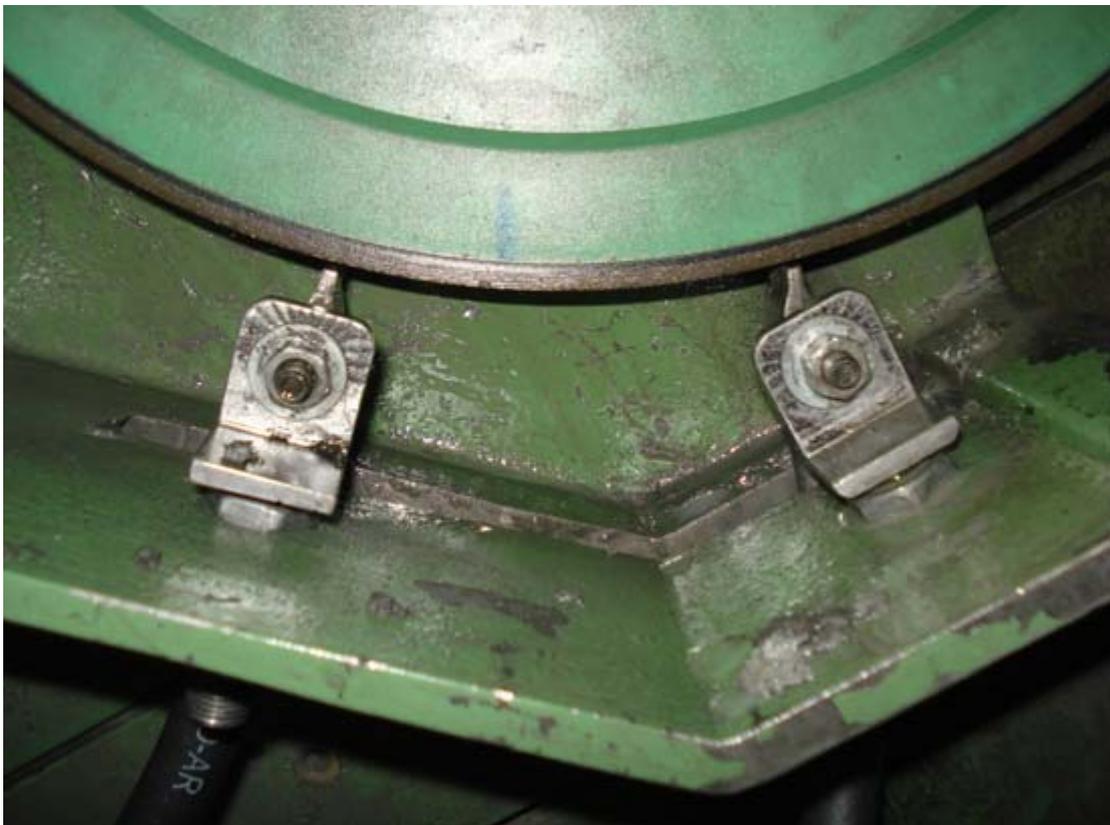


Figura 28: Dois bocais a 90° “direcionados ao centro do rebolo”

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA

4.2.1 Aquisição de Dados

A aquisição dos dados foi realizada por meio de um computador Pentium III 600 Mhz, com placa de aquisição de dados A/D e software LabVIEW versão 7.1 do fabricante *National Instruments*. Os parâmetros coletados foram: potência elétrica (Pelet) consumida pelo motor que acionava a ferramenta, a rotação da ferramenta (n) e emissão acústica.

As aquisições dos dados foram realizadas em tempo real e armazenadas através do software na forma de tensão (V) para posterior manipulação dos dados através de um outro software.

Os dados de rotação e potência elétrica consumida durante o processo de retificação foram transmitidos à placa de aquisição de dados através de um circuito condicionador de sinais que possuía bornes de entradas para o recebimento dos dados. Na Figura 29 é demonstrada a montagem dos equipamentos para a aquisição dos dados.

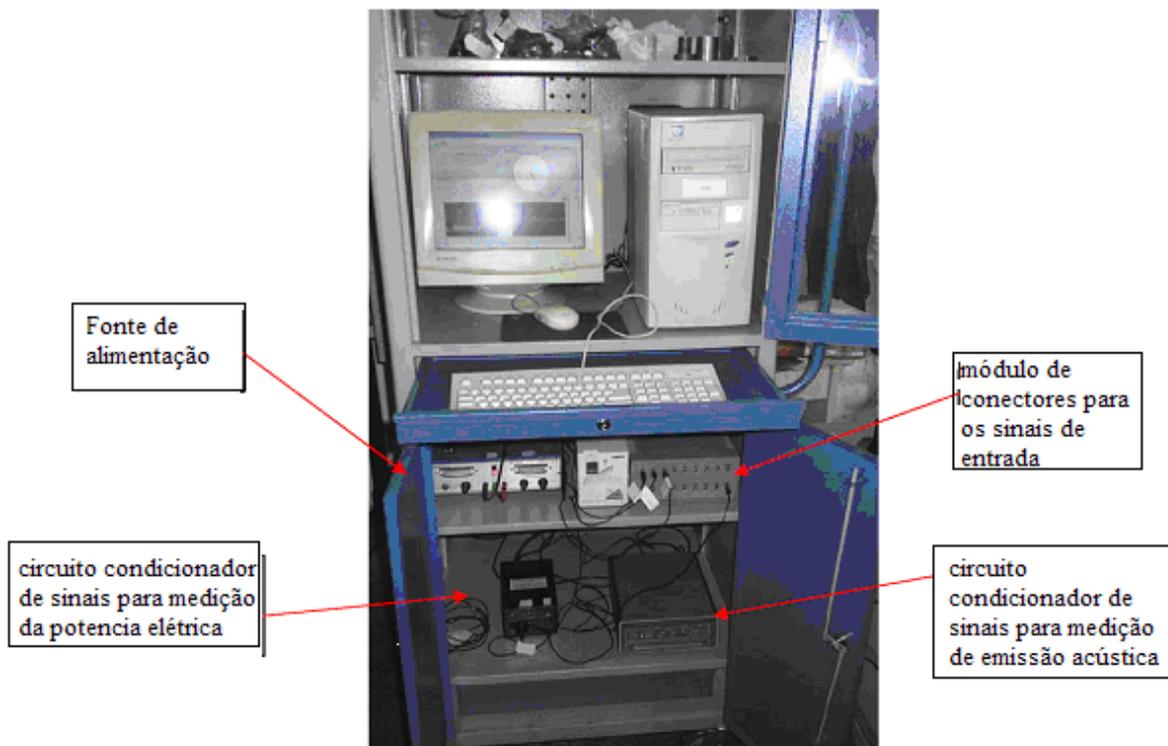


Figura 29: Montagem dos equipamentos para aquisição dos dados.

Para a manipulação e armazenamento dos dados desenvolveu-se um programa no LabVIEW que fornecia uma tela de apresentação para aquisição dos dados conforme a Figura 30.

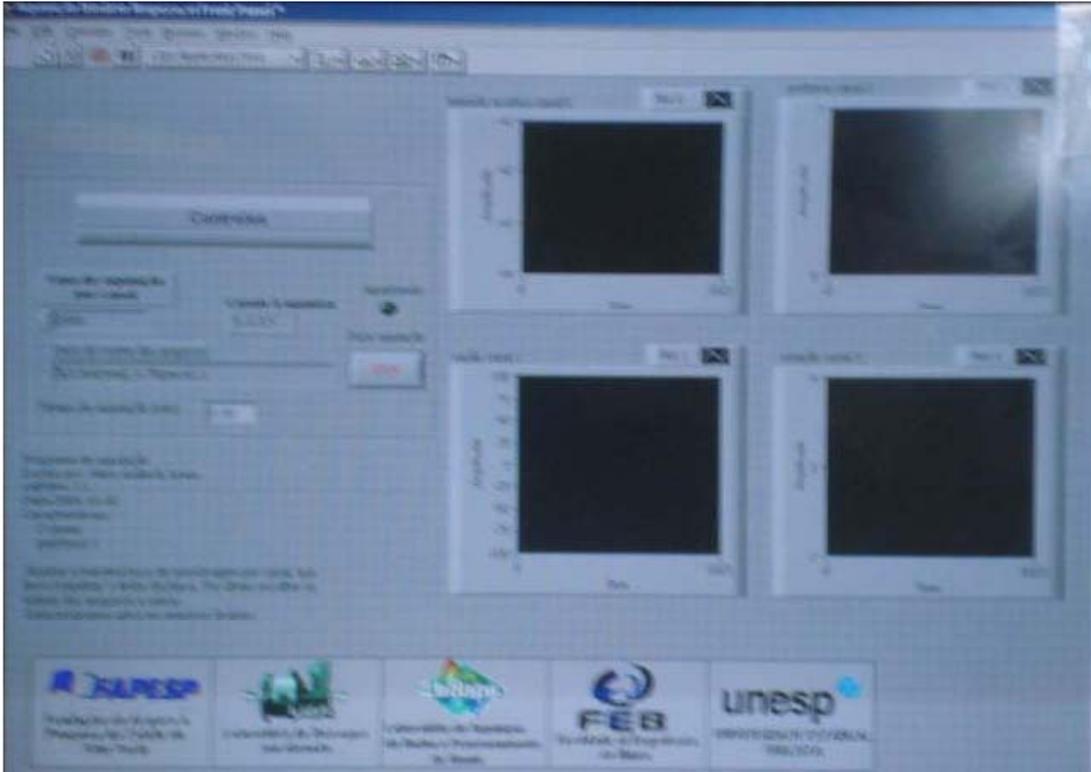


Figura 30: Tela de apresentação do programa de aquisição de dados

Para os ensaios, o sistema foi programado para operar com uma taxa de aquisição de 1000 pontos por segundo. Tal programa realizou a aquisição do sinal da força tangencial de corte e emissão acústica, sendo que estas variáveis de saída serão armazenadas em arquivo para posterior análise.

A programação no *LabView* 7.1 é feita em sub-rotinas, destacando:

- Entrada de dados físicos dos materiais ensaiados;
- Aquisição de dados em tempo real;
- Análise e disposição destes dados em gráficos, simultaneamente à aquisição dos dados;
- Apresentação dos resultados;
- Armazenamento dos dados de interesse em arquivos.

Para manter-se a velocidade de corte constante e igual a 30 m/s compensou-se o desgaste do rebolo através da variação da rotação do rebolo por intermédio de um inversor de frequência.

4.2.2 Potência de Retificação

Nesta pesquisa, a potência de retificação foi medida pela determinação da potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo, por meio do monitoramento dos valores de tensão e corrente elétrica provenientes deste motor elétrico. Para isso, um circuito eletrônico, denominado Curvopower, foi projetado e construído pelo grupo de pesquisa em usinagem por abrasão da faculdade de Engenharia de Bauru coordenado pelo Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, sendo utilizado para transformação dos valores de corrente elétrica e tensão (provenientes do motor) em sinais de tensões compatíveis, para serem enviados a uma placa de aquisição de dados e manipulados pelo programa de aquisição de dados, que foi desenvolvido, utilizando-se o software LabView 7.1, da National Instruments.

A potência de corte de retificação foi obtida por meio de uma metodologia própria de experimentação, a qual visava fornecer a mínima quantidade de erros possíveis, pois no sistema ocorrem perdas, como atrito nos mancais de rolamento, sistema de correias e no motor de indução. A taxa de amostragem utilizada foi de 1000 amostras por segundo a fim de realizar uma ilustração efetiva do processo.

Destaca-se que o processo de calibração da potência elétrica, desenvolvido pelo Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, consiste em instalar lâmpadas incandescentes e resistências de aquecedor cujas potências eram conhecidas e medidas por um watímetro analógico do fabricante LIER, com fundo de escala de 1200W e resolução de 25W. O nível de tensão referente à potência do módulo CurvoPower foi medido por um multímetro digital do fabricante Minipa, modelo ET- 2400.



Figura 31: Circuito eletrônico (CurvoPower) para aquisição da força tangencial de corte

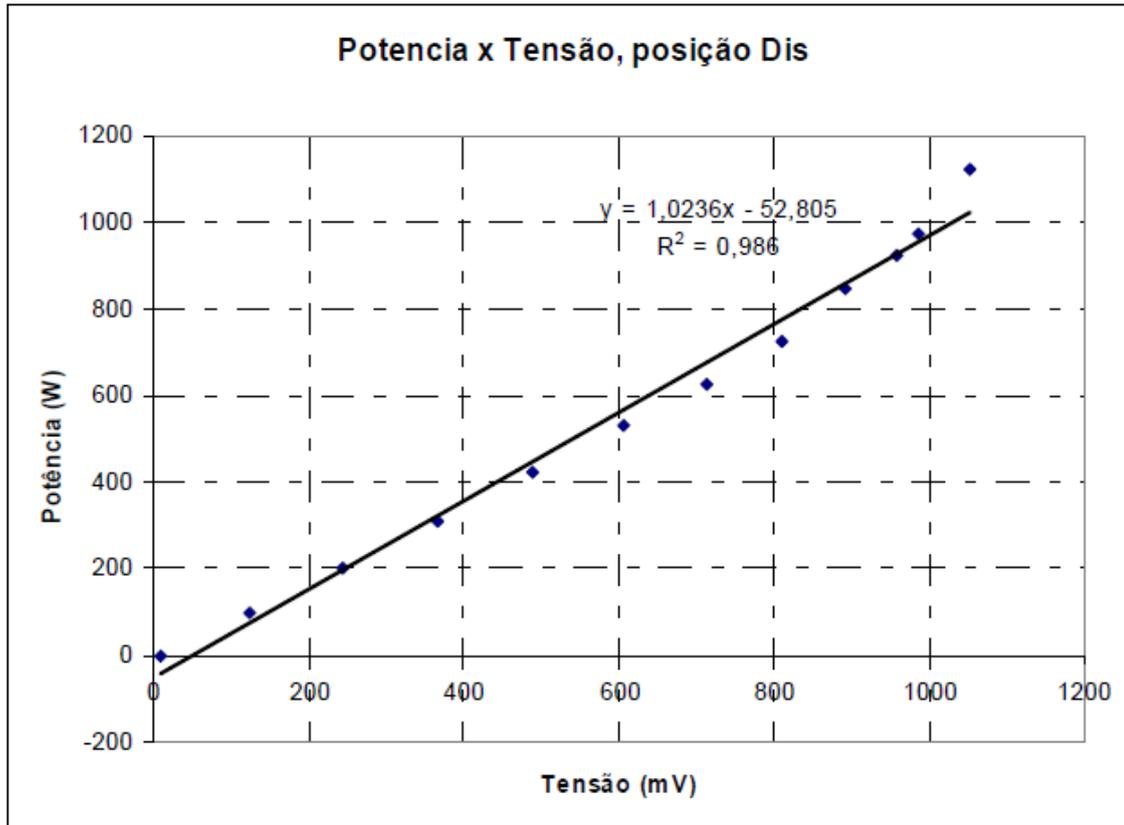


Figura 12: Potência em função da tensão fornecida pelo multímetro

A curva de calibração mostra que a relação entre a potência medida e a tensão de saída do módulo é bem linear. Da teoria estatística (VIEIRA, 1999), R^2 é o coeficiente de determinação que é a proporção da variável total explicada por uma regressão linear. R^2 (R quadrado) indica o quanto foi boa a calibração, e quanto mais próximo de 1, melhor.

Ainda segundo Vieira (1999), r é o coeficiente de correlação e indica o grau de associação linear entre duas variáveis. Em uma regressão linear simples o valor de r é igual a $R^{1/2}$. Com a equação de calibração encontrada determinou-se $R^2 = 0,986$. O Valor de r foi de 0,9929.

A partir dos dados da **Figura 1**, utilizou-se o programa MatLAB® 7.1. para se obter por regressão linear, a equação de calibração

$$P_{\text{elétrica}} = 1,023V - 52,805 \quad (15)$$

Onde: $P_{\text{elétrica}}$: é potência elétrica do circuito calibrado;

V : é a tensão na saída do circuito condicionador de sinais;

Já a calibração da rotação do rebolo foi feita utilizando-se um tacômetro e um multímetro, ambos digitais. Assim, variando os valores de frequência do inversor obtinha-se

uma leitura no tacômetro e simultaneamente no multímetro. Fez-se a leitura para três valores de frequência.

Tabela 4: Valores da frequência, rotação e tensão utilizados para a calibração da curva de rotação do rebolo

| Frequência (Hz) | Rotação (rpm) | Tensão (V) |
|-----------------|---------------|------------|
| 20 | 568 | 2,03 |
| 40 | 1156 | 4,08 |
| 60 | 1754 | 6,09 |

A partir dos dados da Tabela 4, obteve-se por regressão linear a calibração da rotação do rebolo.

$$\text{RPM} = 2,6313 \cdot (\text{V})^2 + 270,75198 \cdot (\text{V}) + 7,5303 \quad (16)$$

Onde: RPM: é rotação do rebolo calibrado.

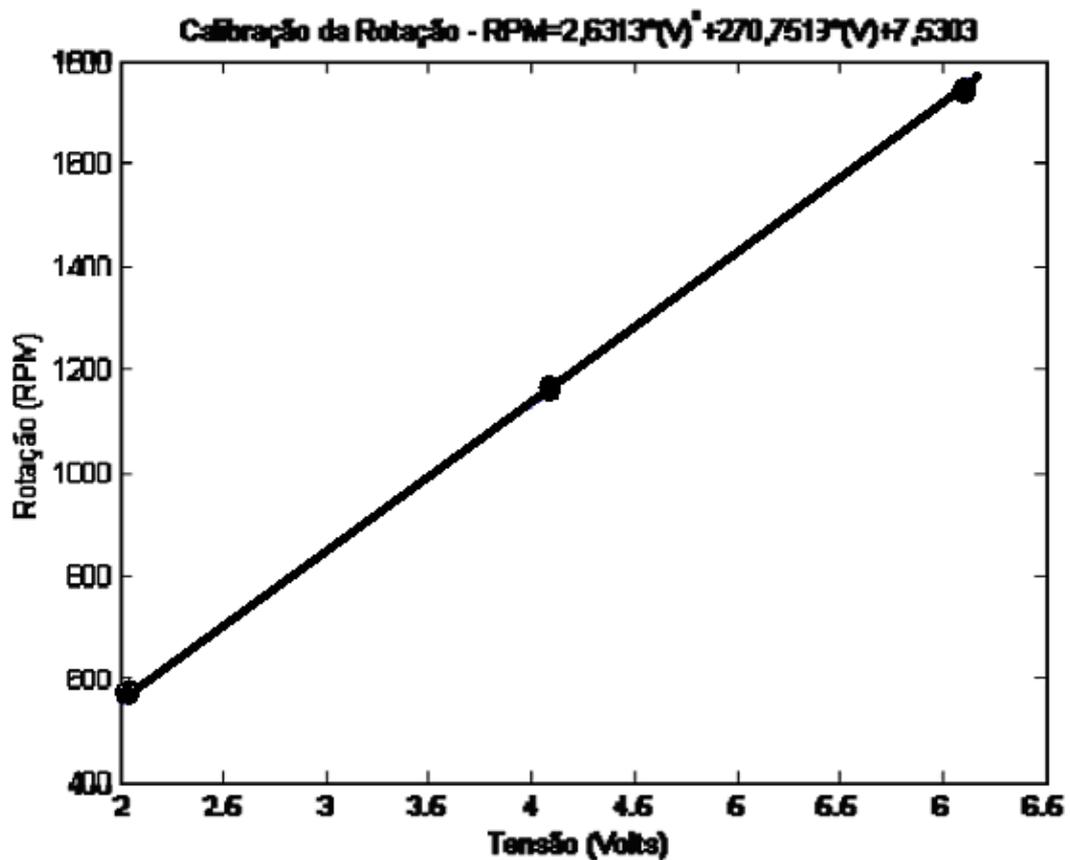


Figura 13: Calibração da rotação do rebolo

A partir de uma metodologia específica desenvolvida pelo grupo de pesquisa do laboratório de Usinagem por Abrasão, com auxílio de curvas fornecidas pelo fabricante do motor, obteve-se a Equação 17, que relaciona a potência elétrica consumida pelo motor e a potência mecânica **P_{mec}** entregue no eixo do mesmo para acionar o rebolo.

$$P_{mec} = -2,3196 * e^{-8} * Pelet^3 + 1,6659 * e^{-4} * Pelet^2 + 5,3593 * e^{-1} * Pelet - 28,961 \quad (17)$$

Onde: *e* é o exponencial de base 10;

A medição da rotação do rebolo durante os ensaios foi realizada por meio de um encoder industrial blindado analógico, marca Abraf com capacidade de medição de até 3000 rpm, faixa de tensão de 0 à 10V (modelo TH 10 R 3000, fabricado pela Abraf Indústria e Comércio LTDA), o qual foi acoplado ao eixo do motor da retificadora por um acoplamento elástico. Este encoder é alimentado por uma tensão de 20 a 25 volts através de uma fonte. O valor máximo de tensão gerado pelo encoder era 10 volts que é a máxima tensão suportável pela placa de aquisição dados para uma rotação máxima de 3000 rpm.

Porém, para a utilização do encoder foi necessário ainda instalar uma fonte de alimentação para alimentar o mesmo com tensões entre 20 V e 25 V, e assim fornecer um valor máximo de tensão de 10 V (máxima tensão suportável pela placa de aquisição dados) para uma rotação máxima de 3000 rpm.

4.2.3 Emissão Acústica

Para a medição da emissão acústica foi utilizado um sistema de Emissão Acústica, modelo DM12, marca *Sensis*, com um sensor fixo que foi posicionado no cabeçote móvel da retificadora próximo do contraponto, para detectar as possíveis variações deste sinal e sua relação com as outras variáveis de saída. A Figura 32 mostra o sensor fixado no cabeçote móvel da retificadora.



Figura 32: Sensor fixo posicionado no cabeçote móvel

A unidade de tratamento calcula o valor RMS do sinal em Volts e o envia para a placa A/D. Foram utilizados como parâmetros constantes da unidade de tratamento de sinais durante todos os ensaios os seguintes itens:

- Ganho de sinal = 2
- Ganho de Ruído = 10
- Ganho Entrada = 10
- Limite 1 = 60 Hz
- Limite 2 = 60 Hz
- Filtro Passa Alta = 250Hz
- Filtro Passa Baixa = 0
- Constante de Tempo = 1
- Canal = 3

4.2.4 Circularidade

A circularidade foi obtida através da utilização de um circularímetro modelo *Tayround 31C* marca *Taylor Hobson* conforme Figura 33.



Figura 33: Medidor de circularidade

Na ponta do braço encontra-se o apalpador com uma ponta de diamante, elemento que efetuava o contato com a peça para a obtenção da circularidade. O detalhe do apalpador pode ser visto na Figura 34.

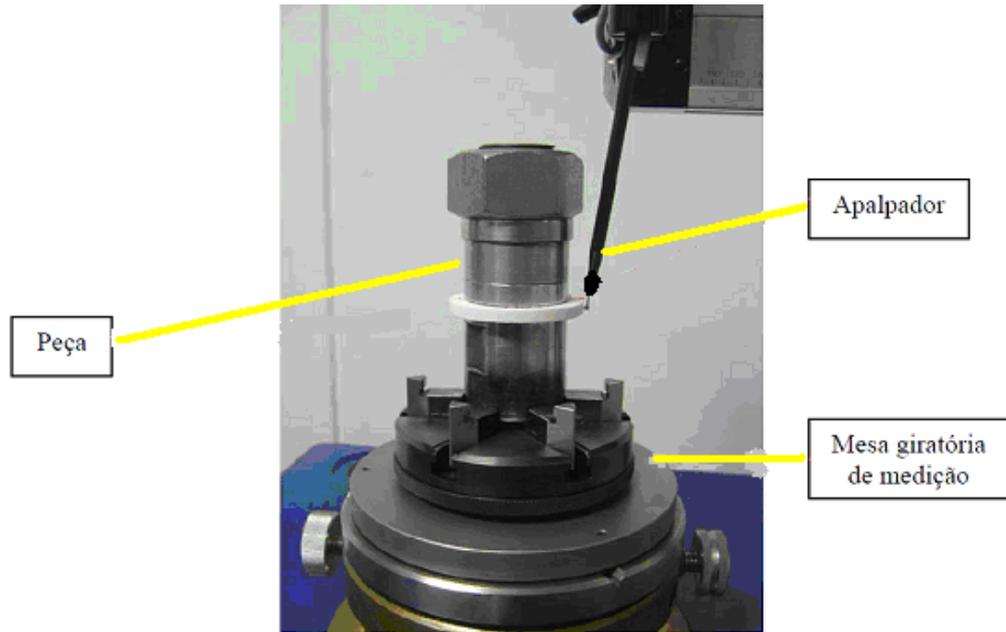


Figura 34: Detalhe do circularímetro

O circularímetro é alimentado por um sistema de ar comprimido, garantindo assim que seus movimentos fossem extremamente precisos. A sequência do sistema utilizado foi um compressor de ar comprimido, um filtro logo após o compressor de uma linha de pressão com tubulação de aço de 25,4 mm de diâmetro. Antes da entrada no circularímetro o ar comprimido percorria um registro geral, um regulador de pressão e um filtro.

Os resultados referentes aos erros de circularidade são referentes às médias aritméticas dos três ensaios com as mesmas condições de usinagem. Cada ensaio era composto por 5 peças, sendo que para cada peça foram obtidas 5 medidas.

4.2.5 Rugosidade

Para a medição da rugosidade média das peças, representado pelo parâmetro Ra, utilizou-se um rugosímetro da marca *Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+*.

A Figura 35 mostra a operação de medição de rugosidade; O rugosímetro foi ajustado para efetuar a medição com um comprimento de medição (*cut-off*) igual a 0,25 mm. Realizaram-se 5 medições em posições distintas na região retificada da peça.



Figura 35: Operação de medição de rugosidade

4.2.6 Limpeza das peças

A limpeza das peças foi feita com produtos geralmente utilizados para a limpeza de peças para ensaios metalográficos, que são: querosene, tinner, álcool e tetracloreto de carbono.

O corpo de prova foi imerso e agitado em béqueres contendo essas substâncias, na ordem citada acima. Após isso, foi secado com uma centrífuga. Foram tomados todos os cuidados tais como a utilização de jaleco, máscaras com filtros para ácidos fortes e óculos de proteção, uma vez que estas substâncias são altamente nocivas à saúde.

4.2.7 Desgaste diametral do rebolo

A marcação do desgaste do rebolo foi possível devido a não utilização da largura total do rebolo de 15 mm, pois a largura utilizada foi de 2 ensaios por rebolo, 2 x 4 mm, totalizando 8 mm de largura utilizada. Criou-se assim um degrau no rebolo. Após a

retificação do corpo de prova marcou-se o desgaste em outro corpo de prova (aço ABNT 1020). O processo de marcação do rebolo é mostrado na Figura 36.



Figura 36: Processo de marcação do rebolo

O desgaste foi medido com a utilização do rugosímetro de marca *Taylor Hobson*, modelo *Surtronic 3+*. Esse rugosímetro foi conectado a um computador, que através do programa *Talymap Silver*, foi possível obter em um gráfico o perfil obtido no rugosímetro, tornando possível a obtenção do degrau correspondente ao desgaste diametral do rebolo.

Na Figura 37 pode-se ver o esquema utilizado para a medição do desgaste diametral do rebolo. O rugosímetro está ligado ao computador, que está utilizando o programa *Talymap Silver*.



Figura 37: Esquema da medição do desgaste do rebolo

O rugosímetro foi ajustado para efetuar a medição com um comprimento de medição (*cut-off*) igual a 4 mm para se obter o degrau correspondente ao desgaste diametral de cada ensaio.

Na Figura 40 está ilustrada um exemplo de gráfico obtido pelo programa Talymap Silver, durante as medições.



Figura 40: Exemplo de gráfico obtido para a obtenção do desgaste diametral do rebolo

Através dos gráficos obtidos, como o da Figura 40 foram traçadas retas equivalentes às faixas de $5\mu\text{m}$ e $-18\mu\text{m}$, que correspondem à parte inferior e superior do degrau, obtendo assim um desgaste diametral para o exemplo da figura de aproximadamente $23\mu\text{m}$.

4.2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura

Após efetuar os ensaios e medições os corpos de prova foram preparados para efetuar a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Neste preparo os corpos de prova foram cortados na máquina policorte do Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), com um disco de corte diamantado para metalografia com dimensões de 235 mm (diâmetro externo), 1,0 mm (espessura), 22 mm (furo). A Figura 38 mostra o disco de corte adquirido.



Figura 38: Disco de corte diamantado utilizado para o corte das peças

Após o corte, a superfícies das amostras foram embutidas em resina polimérica, como na Figura 39 e após isso, foram polidas em uma politriz metalográfica ilustrada na Figura 40, utilizando diferentes pastas de diamante, tendo sido embutidas primeiramente para o polimento.



Figura 39: Amostra Embutida.



Figura 40: Politriz Metalográfica

Foram utilizadas as pastas de diamante com as seguintes granulometrias: 15 μ m, 9 μ m, 6 μ m, 3 μ m, 1 μ m e 0,25 μ m respectivamente. Para cada pasta de diamante foi utilizado um pano de polimento metalográfico novo.

A preparação das amostras consistiu, além do corte e polimento das peças, a fixação dos corpos de prova em suportes de alumínio preparados sob medida para o uso no Microscópio Eletrônico de Varredura. A fixação foi feita com o adesivo bicomponente Araudite, da marca Brascola.

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Instituto de Física de São Carlos (IFSC), da Universidade de São Paulo – USP, *campus* de São Carlos.

Para a caracterização de um corpo de prova cerâmico no microscópio eletrônico de varredura é necessária que seja feita previamente uma deposição nanométrica de ouro sobre as amostras, como ilustrado na Figura 41 Esta deposição foi feita através de um “sputtering”, modelo SCD 050 da Balzers, do próprio Instituto, mostrado na Figura 42.



Figura 41: Amostras preparadas para o MEV, com a deposição de ouro



Figura 42: Equipamento utilizado para deposição nanométrica de ouro nos corpos de prova

A microscopia eletrônica de varredura foi feita com microscópio modelo DSM 960 da Carl Zeiss, Jena, mostrada na Figura 43.



Figura 43: Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado

O objetivo para a realização dos ensaios de MEV foi observar se houveram alterações micro-estruturais no material devido às diferentes condições utilizadas nos ensaios realizados.

4.4 Condições de usinagem obtidas nos Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares foram realizados com o intuito de se obter as melhores condições de usinagem para serem usadas nos ensaios definitivos. As condições ideais encontradas, que foram mantidas constantes em todos os ensaios definitivos foram:

- Velocidade de mergulho (v_f) de 0,5 mm/min;
- Velocidade de corte (v_s) de 30 m/s;
- Rotação da peça (n_w) de 204 rpm;
- Penetração do rebolo na peça (a) de 0,1 mm;
- Tempo de centelhamento (t_s) igual a 5 segundos;
- Largura de retificação de 4 mm;
- Profundidade de dressagem (a_d) de 0,04 mm;
- Vazão do fluido de corte na refrigeração convencional de 17 l/min;
- Vazão do fluido de corte no MQL de 100 ml/h;
- Pressão do ar no MQL de 8 bar;
- Velocidade de saída do ar de 30 m/s no bocal;
- Pressão do sistema de limpeza: 4-7 bar;
- Vazão do ar no sistema de limpeza: 480 l/min;
- Ângulos de incidência do jato de ar comprimido em relação à superfície de corte do rebolo: 30°, 60°, tangente e perpendicular;
- Quantidade de peças cerâmicas por ensaio, 5 peças.

A matriz dos ensaios desenvolvida nessa pesquisa é mostrada na Figura 44.

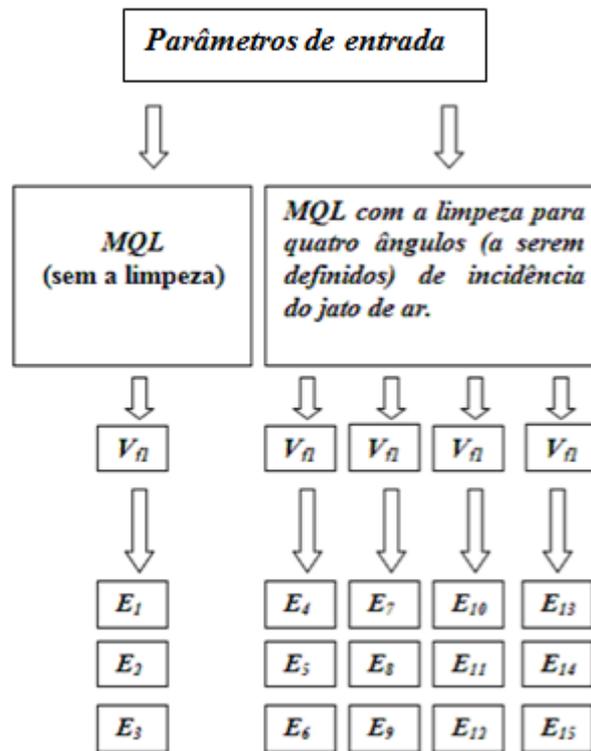


Figura 44: Matriz original de ensaios

No entanto, foi adicionada mais uma condição de refrigeração (três ensaios): a convencional com fluido em abundância. Isso foi feito para ter um poder maior de comparação dos resultados obtidos com a limpeza, já que o método convencional é amplamente utilizado na indústria.

4.4.1 Sequência da realização dos Ensaios

Durante a realização de cada ensaio com refrigeração convencional, verificaram-se as condições de concentração do fluido de corte. Caso o mesmo não estivesse nas condições desejadas, procedimentos de correção eram tomados até que as condições ideais fossem alcançadas. Ressalte-se o uso de bactericidas e anti-espumantes junto com o fluido de corte.

Cada faixa do rebolo foi utilizada para realização de 2 ensaios. Assim, a cada 2 ensaios o rebolo diamantado era dressado. Como os parâmetros de dressagem eram iguais, a ferramenta abrasiva apresentava as mesmas condições iniciais para todos os ensaios. Na operação de dressagem do rebolo foi retirada uma camada de material até que a ferramenta abrasiva não apresentasse nenhuma marca referente à usinagem. A operação de dressagem é mostrada na Figura 45.



Figura 45: Operação de dressagem do rebolo

O anel cerâmico foi encaixado no mandril e este, por sua vez, fixado entre pontas na máquina. Este tipo de sistema é um dos mais utilizados na prática garantindo assim rapidez, facilidade de fixação e precisão.

Estando a peça devidamente encaixada preparou-se o computador, executando-se o programa de aquisição de dados desenvolvido utilizando-se o programa LabVIEW® ,versão 7.1, para que no instante que fosse acionada a máquina retificadora, fossem captados os valores instantâneos de rotação do rebolo, potência e nível RMS do sinal de emissão acústica.

O ajuste da velocidade de avanço foi feito na própria máquina. No programa CNC da máquina constava a velocidade de avanço de 1 mm/min. Na máquina há a possibilidade de trabalho em 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150% e 150% da velocidade de avanço do programa. Escolheu-se assim, após a realização dos ensaios preliminares, a velocidade de 50%, ou seja, a velocidade de avanço de 0,50 mm/min.

Antes do início do ensaio a máquina retificadora foi vedada, de forma a minimizar a perda de fluido de corte para o ambiente, uma vez que isto resultaria em poluição do ambiente de trabalho e variação na concentração do fluido.

A aquisição dos dados era iniciada, o rebolo foi acionado pelo inversor de frequência. Deixando-se um tempo de aproximadamente 3 segundos antes do início da operação de usinagem para efeitos de análise da força em vazio.

Depois de a peça ser retificada, pausou-se o programa de aquisição de dados e o rebolo foi desligado para a troca da peça. Mesmos procedimentos foram tomados até que a 5ª peça fosse retificada, onde o programa de aquisição de dados era parado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para efeitos de resultados de comparação, objetivados desde o começo desta pesquisa, nas figuras são considerados os três métodos de refrigeração (convencional, MQL e MQL com limpeza de rebolo); ou seja, os dois inicialmente propostos e, adicionalmente, o método convencional para que os resultados sejam melhores comparados ao que se faz nas empresas.

Ressalta-se que para as variáveis analisadas, mediante a construção de gráficos de barra e de linha para a circularidade, de linha para a rugosidade e de barra para o desgaste do rebolo, calculou-se os respectivos desvios padrões, os quais foram plotados juntamente com os valores médios reais das três repetições executadas.

5.1 Rugosidade

A Figura 46 apresenta os resultados obtidos para a rugosidade média Ra, referente às condições de lubri-refrigeração convencional, a técnica do MQL com e sem a limpeza de rebolo, para os diversos ângulos utilizados. Os valores de rugosidade apresentados são médias de 5 medições de rugosidade em posições diferentes nos corpos de prova, para cada um dos 3 ensaios realizados para cada condição de lubri-refrigeração.

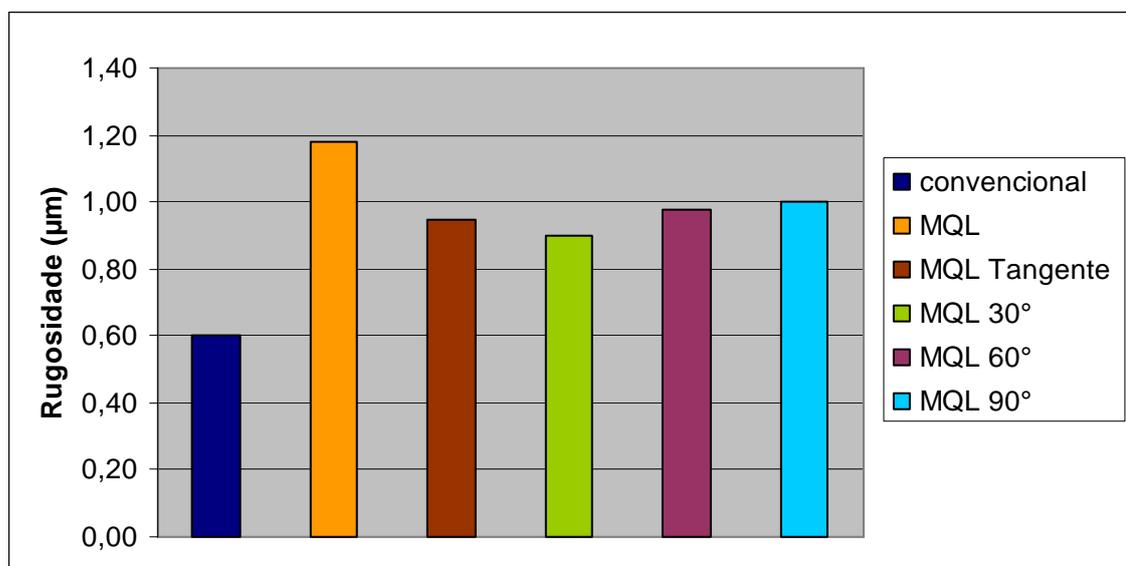


Figura 46: Resultados de rugosidade para as diferentes condições de lubri-refrigeração

Por meio de uma análise geral dos resultados de rugosidade, a maioria dos valores está abaixo de 1,6 µm, valor máximo para uma peça retificada (DINIZ et al, 2001).

Pode-se observar que o valor de rugosidade foi menor para a lubri-refrigeração convencional em comparação com a técnica do MQL, possivelmente provocada pela melhor remoção de cavaco da zona de corte feita pela refrigeração convencional. Na refrigeração com a técnica do MQL, é formada uma “borra” de óleo com cavaco de difícil remoção, causando um aumento da rugosidade. Já em relação à técnica do MQL com a limpeza da superfície de corte do rebolo, nota-se melhorias na rugosidade, em relação ao MQL sem limpeza, porém ainda não superaram a refrigeração convencional, devido à difícil remoção do óleo com cavaco. Assim, mesmo com a utilização do sistema para limpeza do rebolo que foi utilizado na sua condição máxima de trabalho (com vazão do ar comprimido de $8,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e pressão de $7,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ no bocal) não foi suficiente para a efetiva limpeza da superfície de corte do rebolo. A “borra” gerada na retificação da cerâmica manteve-se aderente com a utilização de um único bocal.

Considerando os valores médios dos resultados de rugosidade, mesmo com as limitações na aplicação do ar comprimido para a limpeza da superfície de corte, houve uma sensível melhoria que pode ser constatada pela relação entre a refrigeração convencional com a por MQL sem limpeza, cerca de 90% de diferença, entre a refrigeração convencional com a por MQL com limpeza na sua melhor condição (aplicação tangente), com cerca de 50% de diferença.

Com relação à eficiência do sistema de limpeza por meio do ar comprimido, essa é uma função do ângulo de incidência do ar, já que a pressão e vazão do sistema foram mantidas constantes.

Assim nota-se que a refrigeração com a técnica do MQL com limpeza obteve resultados bons quando comparados ao MQL sem limpeza, pois em todos os ângulos utilizados houve uma melhora. Porém esses resultados não foram tão bons quando comparados à refrigeração convencional, já que a limpeza da “borra” não foi total. Isso talvez possa ser resolvido com a utilização de mais de um bocal de limpeza.

Além disso, nota-se que com a velocidade de avanço de $0,50 \text{ mm/min}$ o ângulo que obteve uma maior eficiência na limpeza foi o tangente à superfície de corte do rebolo.

5.2 Desgaste Diametral do Rebolo

A Figura 47 mostra os resultados obtidos para o desgaste diametral do rebolo, sendo comparadas nesta figura às condições de refrigeração convencional, MQL e o MQL com a técnica da limpeza de rebolo, com os 4 ângulos utilizados na mesma.

Analisando-se os resultados nota-se que a refrigeração convencional obteve o melhor resultado novamente, porém a limpeza melhorou de forma geral os resultados obtidos no MQL, com exceção do ângulo de 90° que obteve um resultado um pouco acima do MQL sem limpeza. No caso do desgaste diametral do rebolo a limpeza com ângulo tangente foi a mais eficiente, como ocorrido na rugosidade.

O desgaste obtido com a utilização da limpeza com ângulo tangente foi 40% maior do que com o obtido na refrigeração convencional. Já, com a utilização do MQL sem limpeza, esta diferença foi de cerca de 139%; ou seja, a diferença entre os valores obtidos é significativa.

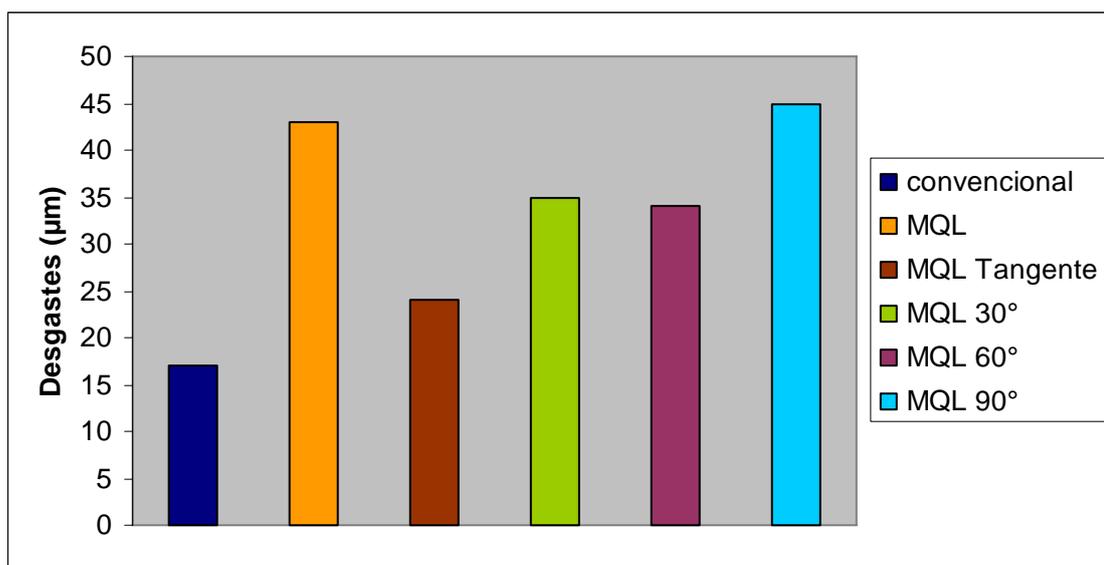


Figura 47: Resultados de desgaste diametral do rebolo para as diferentes condições de lubri-refrigeração

Novamente, como a limpeza da superfície de corte do rebolo não foi eficiente o suficiente para uma remoção total do material que impregna o rebolo; assim, sua eficiência ficou prejudicada; porém este prejuízo foi menor com a utilização da limpeza da superfície de corte na posição tangente.

Assim nota-se que a refrigeração com a técnica do MQL com limpeza obteve melhores resultados quando comparados ao MQL sem limpeza, pois em quase todos os

ângulos utilizados (com exceção do ângulo de 90°) houve uma melhora. Porém esses resultados não foram tão bons quando comparados à refrigeração convencional, já que a limpeza da “borra” não foi total. Isso talvez possa ser resolvido com a utilização de mais de um bocal de limpeza.

Além disso, nota-se que com a velocidade de avanço de 0,50 mm/min o ângulo que obteve uma maior eficiência na limpeza foi o tangente à superfície de corte do rebolo.

5.3 Circularidade

A Figura 48 apresenta os resultados obtidos para os erros de circularidade, referentes à comparação entre as condições de lubri-refrigeração convencional, a técnica do MQL com e sem a limpeza de rebolo.

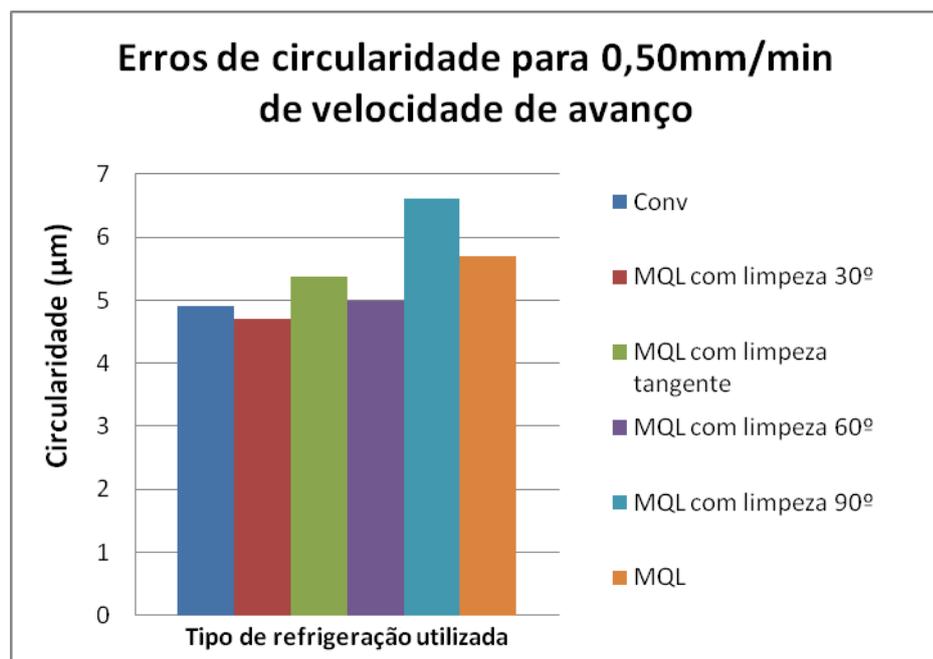


Figura 48: Circularidades para as diferentes condições de lubri-refrigeração

Pode-se notar que os resultados médios, de uma maneira geral, foram próximos, sendo que a técnica do MQL com limpeza da superfície de corte a 30° forneceu o melhor resultado. No entanto, a limpeza da superfície de corte para as outras posições analisadas por MQL apresentaram resultados piores do que quando se utilizou a refrigeração convencional. Observa-se ainda que com exceção da limpeza com 90°, todos os ângulos obtiveram, em média, uma melhora em relação ao MQL sem limpeza.

Nota-se que o ângulo de 30° obteve resultados médios muito satisfatórios, chegando até a obter resultados melhores que na refrigeração convencional, para erro de circularidade. Com isso, o ângulo mais eficiente não foi o tangente, como na rugosidade e desgaste diametral, porém nota-se que a técnica da limpeza com ângulo de incidência tangente, obteve resultados mais satisfatórios que a técnica do MQL, obtendo assim resultados intermediários ao MQL e à refrigeração convencional, portando tornando-se viável também. A diferença entre os valores médios dos resultados de circularidade com refrigeração convencional e com refrigeração por MQL com limpeza a 30° foi de apenas 2%. Assim, possivelmente quando houve a fixação da peça no mandril pelas suas laterais, a não homogeneidade da planicidade em ambos os lados, proporciona uma pequena, variação no erro de circularidade.

Ocorreram algumas incoerências na expectativa dos valores de circularidade em relação aos resultados obtidos de rugosidade e desgaste devido à circularidade ser uma grandeza mais sensível à rigidez do sistema, máquina, ferramenta, peça, entre outros.

Um exemplo deste tipo de incoerência é o de o ângulo de 30° obter resultados melhores que a refrigeração convencional, o que não ocorreu na rugosidade e desgaste diametral. Ou então o fato de o ângulo tangente não ter sido a condição de limpeza mais eficiente, como na rugosidade e circularidade.

5.4 Potência de Retificação

Neste item são apresentados os resultados potência de retificação (W), variando-se as técnicas de lubri-refrigeração.

Estes resultados foram obtidos em tempo real, durante a usinagem, podendo ser comparadas às técnicas de refrigeração pela Figura 49.

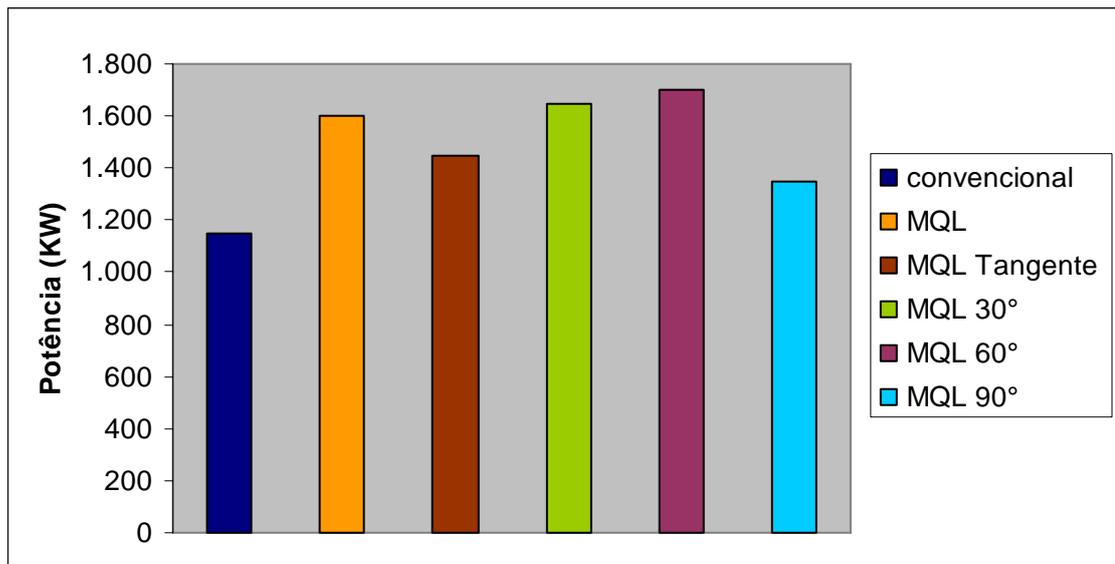


Figura 49: Resultados de potência de retificação para as diferentes condições de lubri-refrigeração

Pode-se notar que o ensaio convencional foi o que obteve um resultado menor de potência de retificação, o que é coerente com os resultados de rugosidade e desgaste diametral. Isso ocorre devido à melhor remoção de cavaco da região de corte, propiciada por esse tipo de refrigeração.

Nota-se ainda que neste caso o MQL sem limpeza não foi o pior resultado, pois a limpeza com os ângulos de incidência de 30° e 60° obtiveram potências de retificação ligeiramente maiores. Como a limpeza com os ângulos de 30° e 60° obtiveram melhores resultados de rugosidade em relação ao MQL sem limpeza. Esses ângulos criam maior força de reação no rebolo que irá retirar mais eficientemente os cavacos aderidos ao poro, reduzindo a rugosidade, mas, ao mesmo tempo, essa reação irá gerar uma maior componente tangencial contrária à rotação do rebolo, aumentando, assim, a potência de usinagem, o que explica o fato de que a potência do MQL com os ângulos de 30° e 60° ser maior que a do MQL sem limpeza.

Isso também explica o fato de que a potência de retificação para as condições de limpeza com o ângulo de 90° ser menor que a da limpeza tangente (melhor rugosidade para a limpeza), já que assim a limpeza tangente gera uma força contrária à rotação do rebolo maior, aumentando a potência de corte.

Assim nota-se que a refrigeração com a técnica do MQL com limpeza obteve, em alguns casos, resultados melhores quando comparados ao MQL sem limpeza. Porém esses

resultados não foram tão bons quando comparados à refrigeração convencional, demonstrando que a limpeza foi eficiente se comparada ao MQL sem limpeza.

Além disso, nota-se que com a velocidade de avanço de 0,50 mm/min o ângulo que obteve uma maior eficiência na limpeza foi de 90° com relação à superfície de corte do rebolo (em direção ao centro do rebolo).

5.5 Emissão Acústica

Na Figura 50 são mostrados os resultados de emissão acústica (RMS) em Volts (V) e são apresentados em função das condições de lubri-refrigeração.

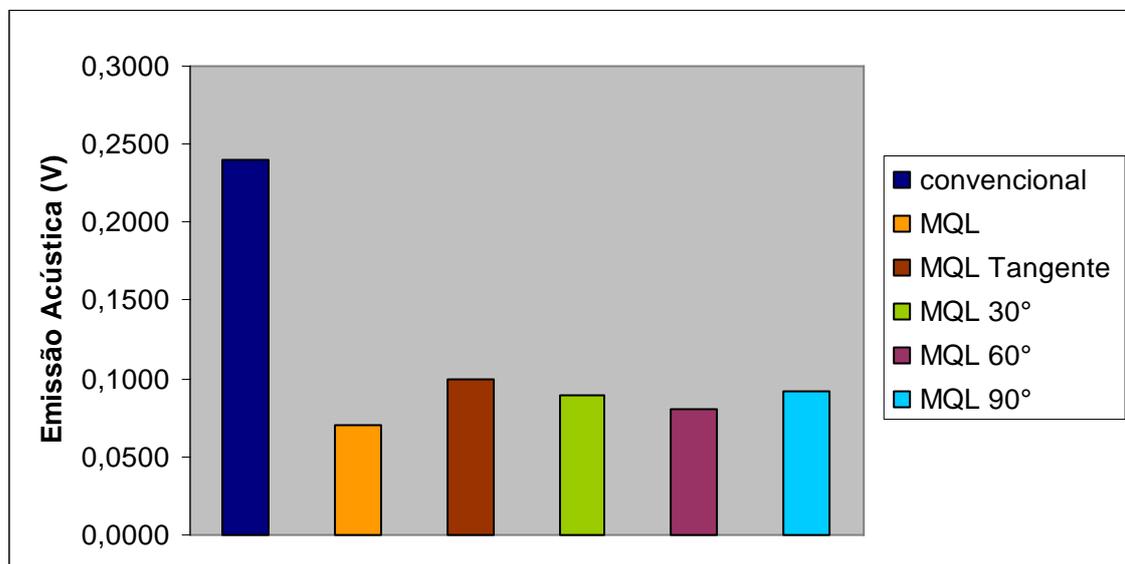


Figura 50: Resultados de emissão acústica para as diferentes condições de lubri-refrigeração

Nota-se neste caso que a refrigeração convencional, obteve melhores resultados de rugosidade e desgaste diametral, foi a que obteve o maior nível de emissão acústica seguida pela limpeza tangente, que obteve a segunda melhor rugosidade e desgaste.

Já o MQL sem limpeza obteve a maior rugosidade e a menor emissão acústica. Com isso nota-se que na emissão acústica os resultados foram inversamente proporcionais à rugosidade e desgaste diametral do rebolo.

Isso ocorre por causa da borra de óleo formada no MQL, com e sem limpeza. A borra remanescente amortece os impactos dos grãos abrasivos no material cerâmico, gerando

uma menor emissão acústica. Por isso quanto maior a eficiência da limpeza, maior a emissão acústica.

5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

A integridade superficial de uma peça é de extrema importância. Danos causados à superfície de um material podem afetá-lo significativamente, causando alterações na resistência ao desgaste, nucleação e propagação de trincas e aceleração do processo de fadiga da peça.

O MEV é uma poderosa técnica de avaliação microestrutural, possibilitando análises do estado de superfícies e noção de profundidade.

Nas Figura 514, 55 e 56 a seguir estão representados as microscopias eletrônicas de varredura dos ensaios, convencional, MQL sem limpeza e MQL com limpeza tangente (melhor desempenho), respectivamente.

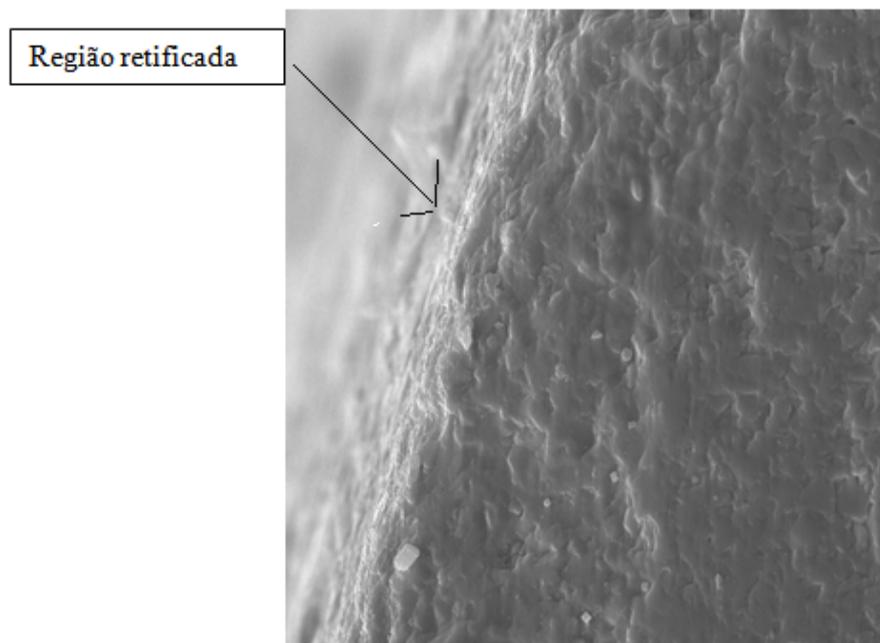


Figura 51: Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração convencional (1000 x)

Analisando a Figura 51 percebe-se que, na refrigeração convencional, o modo frágil de remoção do material predominou no processo. Nota-se um bom acabamento, apesar do modo de remoção frágil, que pode gerar micro trincas.

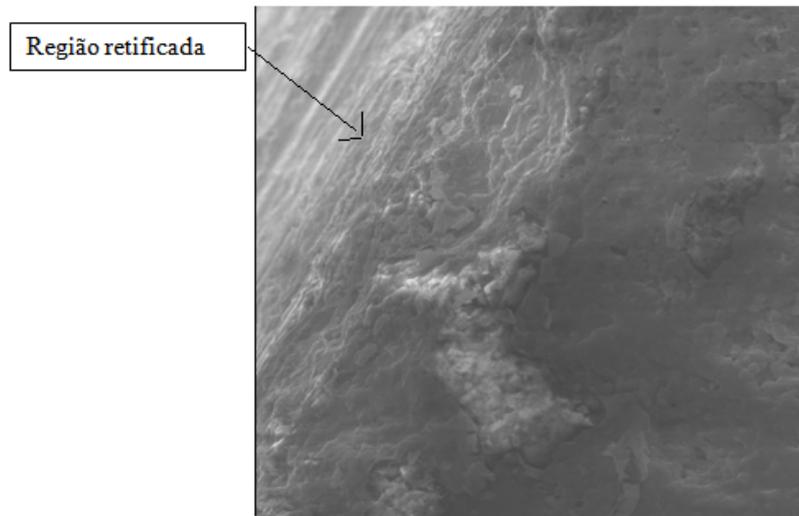


Figura 52: Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração da técnica do MQL sem limpeza (1000 x)

Analisando a Figura 52 percebe-se que, na refrigeração com a técnica do MQL, predominou o modo de remoção dúctil, o que proporciona ótimas condições de acabamento superficial no que diz respeito à resistência do material devido a presença reduzida de micro trincas, agente concentradores de tensão.

A melhor caracterização da superfície da peça retificada com a refrigeração utilizando a técnica do MQL em relação à peça retificada com a refrigeração convencional pode ser explicada pelo maior poder lubrificante do óleo utilizado na técnica do MQL em comparação ao fluido de corte emulsificador utilizado na refrigeração convencional.

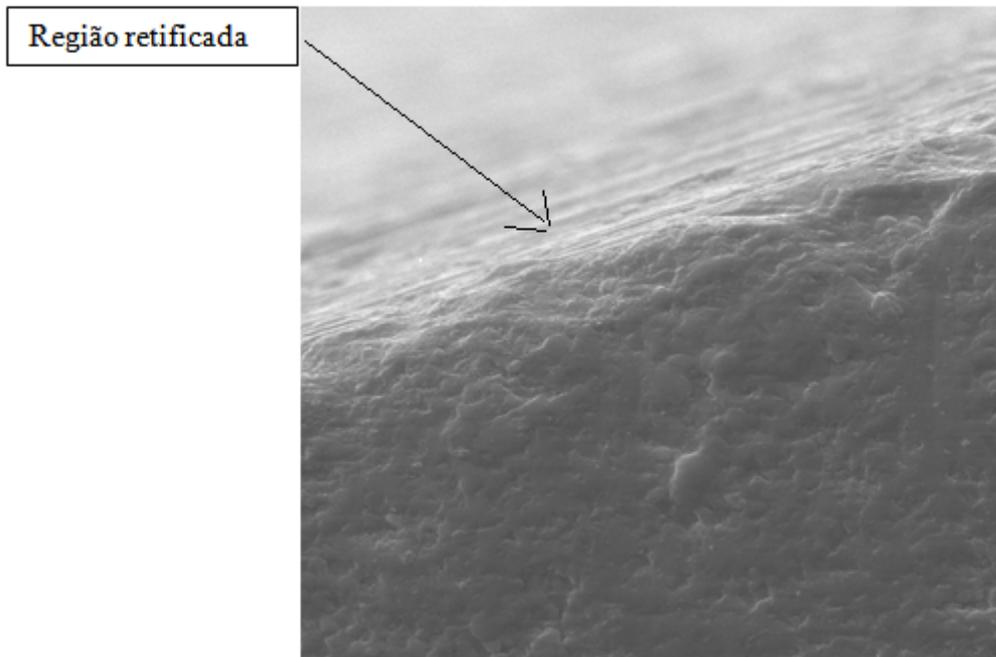


Figura 53: Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração da técnica do MQL com limpeza tangente (1000 x).

Na Figura 53 pode-se notar um modo de remoção dúctil predominante também, devido à utilização do mesmo fluido de corte que na técnica do MQL sem limpeza, porém este acabamento superficial está ainda melhor que o do MQL, pois com a limpeza foi possível alcançar uma boa remoção da borra de óleo formada na técnica do MQL, proporcionando comparativamente melhores acabamentos superficiais.

6 CONCLUSÕES

Uma análise geral dos resultados indica que a refrigeração pela técnica da refrigeração convencional é a que proporciona melhores resultados de rugosidade, erro de circularidade da peça e desgaste diametral.

De acordo com todos os resultados pode-se notar que:

- A utilização da limpeza juntamente com a técnica do MQL torna-se viável, pois de uma maneira geral a técnica do MQL com limpeza obteve melhores resultados na qualidade da peça e desgaste da ferramenta, em relação ao MQL sem limpeza.

- A limpeza com um ângulo tangente à superfície do rebolo, foi a condição de limpeza que obteve melhores resultados para a limpeza. Melhorando assim a técnica do MQL, não chegando a resultados tão satisfatórios quanto à convencional. Porém a técnica do MQL com limpeza tem suas vantagens, na área ambiental e em relação a saúde do operador, podendo assim mesclar as vantagens do MQL, com resultados mais próximos dos resultados da refrigeração convencional.

- A potência de retificação apresenta resultados inversamente proporcionais em relação à rugosidade, desgaste diametral e circularidade, na utilização do sistema de limpeza do rebolo, pois além da influência da fenomenologia do corte, há também a influência da força que o jato de ar imprime ao rebolo para retirar os cavacos aderidos, sendo que em geral, quanto maior a eficiência da limpeza, maior a potência de corte.

- A emissão acústica também apresenta resultados inversamente proporcionais em relação à rugosidade, desgaste diametral e circularidade, na utilização do sistema de limpeza do rebolo, pois a “borra” de óleo formada na retificação com refrigeração por MQL com e sem limpeza do rebolo, amortece os impactos dos grãos abrasivos no material cerâmico, gerando uma menor emissão acústica.

- Torna-se possível uma maior substituição dos tradicionais fluidos de corte por novos métodos de lubri-refrigeração, com a aplicação do MQL juntamente com a limpeza na retificação cilíndrica externa de mergulho. Entretanto, existem ainda muitas variáveis nesse processo de substituição que podem ser melhoradas e precisam ser estudadas para tal fim.

7 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento de metodologias para limpeza de rebolos por métodos de contato mecânico para a retificação cilíndrica externa de mergulho de cerâmicas, utilizando-se a aplicação do fluido de corte por mínima quantidade de lubrificação (MQL).
- Aprofundamento do estudo de sistema com MQL com jato de ar comprimido para a remoção de detritos na superfície de corte do rebolo fabricado com ligante metálico, na retificação de materiais cerâmicos, visando minimizar a rugosidade, desgaste diametral do rebolo e potência de retificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGARWAL, S., RAO, V.; Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2007) 698–710.
- ANDERSON, D., WARKENTIN, A., BAUER, R. Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding. *Journal of materials processing technology*, 204, p. 269-278, 2008.
- ASKELAND, D.R.; PHULÉ, P.P. *The science and engineering of materials*. Pacific Groove. Thomson Brooks/Cole, 2003.
- BALDO, E. D. Redução do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com auxílio da emissão acústica. Dissertacao de Mestrado - UNICAMP, Campinas, 1994.
- BARTZ, W.J. Lubricants and the environment, *Tribology International*, 31, p. 35–47, 1998.
- BIGERELLE, M.;HAGEGE, B.;EL MANSORI,M. Mechanical modeling of micro-scale abrasion in superfinish belt grinding. *Tribology Internacional*, Vol. 41, p. 992-1001, 2008.
- BLAEDEL, K.L.; TAYLOR, J.S.; EVANS, C.J., Ductile-regime grinding of brittle materials. In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. *Machining of Ceramics and Composites*, Marcel Dekker, Cap.5, 1999.
- BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 48, p. 581-598, 1999.
- BYRNE, G., SCHOLTA, E. Environmentally clean machining processes—a strategic approach. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 42, p. 471–474, 1993.
- CAMERON, A.; BAUER, R.; WARKENTIN, A. An investigation of the effects of wheel cleaning parameters in creep-feed grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, V. 50, p. 126-130, 2010.
- CHEN, X., ROWE, W.B., CAI, R.; Precision grinding using CBN wheels, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 585–593.
- CHOI, T.J.; SUBRAHMANYA, N.; LI, H.; SHIN Y.C. Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.48, p. 61–72, 2008.
- DEMETER, E.C.; HOCKENBERGER, M.J. The application of tool path compensation for the reduction of clamping-induced geometric error. *International Journal of Production Research*, v.12, p. 35, 1997.

- DEMIRCI, I.; MEZGHANI, S.; MANSORI, N. E. On Material Removal Regimes for the Shaping of Glass Edges: Force Analysis, Surface Topography and Damage Mechanisms. Springer Science-Business Media, LLC 2008.
- DHAR, N.; ISLAM, S.; KAMRUZZAMAN, M. Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness in Turning AISI-4340 Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, p. 299-304, 2006.
- DINESHI, G., THAKUR, B., RAMAMOORTHY, L., VIJAYARAGHAVAN, Investigation and optimization of lubrication parameters in high speed turning of superalloy Inconel 718, *Int Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 50, p. 471–478, 2010.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. Artiber Editora Ltda., Campinas, SP, Brasil, 6a Edicao, 2008.
- EBBRELL, S.; WOOLLEY, N.H.; TRIDIMAS, Y.D.; ALLANSON, D.R.; ROWE, W.B. Effects of cutting fluid application methods on the grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.40, p. 209–223, 2000.
- FUSSE, R.Y.; FRANCA, T.V.; CATAI, R.E.; SILVA, L.R.; AGUIAR, P.R.; BIANCHI, E.C. Analysis of the cutting fluid influence on the deep grinding process with a CBN grinding wheel. *Materials Research, Sao Carlos - SP*, v. 7, n. 3, p. 451-457, 2005.
- GRAF, W. *Cylindrical Grinding*. WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 87p., 2004.
- GUO, C. Energy partition and cooling during grinding. In: 3rd International Machining & Grinding Conference, SME, October 4-7, Cincinnati, Ohio, USA, 2000, p. 1-12.
- GUO, C.; SHI, Z.; ATTIA, H.; MCINTOSH, D. Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated CBN Wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 56, p.343-346, 2007.
- HECKER, R. L.; LIANG S. Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 43, p. 755–761, 2003.
- HECKER, R.L., LIANG, S.Y., WU, X.J.; Grinding force and power modeling based on chip thickness Analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.33, p.449-459, 2007.
- HEINZEL. C.; BLEIL, N. The Use of the Size Effect in Grinding for Work-hardening. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 56, p. 327-330, 2007.
- HEISEL, U.; LUTZ, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. The Minimum Quantity Lubricant technique and its application in the cutting process. *Machines and metals magazine, Brazil*, No.386, Febr., 1994, p. 22-38.

- HOLESOVSKY, F., HRALA, M.; Integrity of ground cylindrical surface, *Journal of Materials Processing Technology* 153–154 (2004) 714–721.
- HONG, S.Y.; BROOMER, M. Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Clean Products Process*, 2, p. 157–166, 2000.
- HOWELL, J.K.; LUCKE, W.E.; WHITE, E.M. *Health and Safety Aspects in the Use of Metalworking Fluids*, by Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- HOWES, T.D.; TONSHOFF, H. K.; HEUER, W. Environmental aspects of grinding fluids, In: *Annals of the CIRP, Keynote Paper*, v. 40, n.2, p.623-630, 1991.
- HUANG, H.; YIN, L.; ZHOU, L. High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels. *Journal of Materials Processing Technology* , 141, p.329- 36, 2003.
- HWANG, T. W.; EVANS, C. J.; MALKIN, S. An Investigation of High Speed Grinding with Electroplated Diamond Wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 49, p. 245-248, 2000.
- IRANI R.A., BAUER R.J., WARKENTIN A., A review of cutting fluid application in the grinding process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 1696–1705.
- JACKSON, M.J.; KHANGAR, A.; CHENC, X.; ROBINSON, G.M.; VENKATESH, V.C.; DAHOTRE N.B. Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, 185, p.17-23, 2007.
- JEDRZEJEWSKI J.; MODRZYCKI W. Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools. *Proc. 32nd Int. MATADOR Conf*, Manchester, UK, 1997.
- KHENAIFFES. M. *Investigação de novas ferramentas estatísticas e utilização de microcontrolador do monitoramento da queima na retificação plana tangencial*. 2006. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Estadual Paulista, Bauru 2006.
- KING, R. I.; HAHN, R. 5. *Handbook of modern grinding technology*, 3a ed., Cap.6, p.119-167, 1992.
- KOENIG W., ARCISZEWSKI, A. von; Continuous dressing—dressing conditions determine material removal rates and workpiece quality, *Ann. CIRP* 37 (1) (1988) 303–307.
- KÖNIG, W. *Tecnologia de fabricação: retificação, brunimento e lapidação*. Tradução Weingaertner, W. L., VDI-Verlag, Düsseldorf, Alemanha, vol. 2, 1990, p. 89-99.
- KRAMER, N. In-Process Identification of Material-Properties by Acoustic Emission Signals. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v.56, p. 331-334, 2007.

- KRUEGER, M.K.; YOON, S.C.; GONG, D. New Technology in Metalworking Fluids and Grinding Wheels Achieves Tenfold Improvement in Grinding Performance. Presented at the Coolants/Lubricants for Metal Cutting and Grinding Conference, 2000.
- LEE, S.W., LEE, Y.C, JEONG, H.D., CHOI, H.Z.; The effect of high pressure air jet on form accuracy in slot grinding, *Journal of Materials Processing Technology* 128 (2002) 67–72.
- LI, X.P., SEAH, K.H.W.; A pressured air jet approach to tool wear minimization in cutting of metal matrix composites, *Wear* 255 (2003) 1352–1358.
- LI, X.P., SEAH, K.H.W.; A pressured air jet approach to tool wear minimization in cutting of metal matrix composites, *Wear* 255 (2002) 1352–1358.
- LIANG, S.X. Grinding of ceramics: mechanisms, forces and coolant evaluation. 1992. 113 f. Dissertação (Mestrado) – University of Connecticut, Estados Unidos, 1992.
- LIAO, Y. S.; LUO, S. Y.; YANG, T. H. A thermal model of the wet grinding process. *Journal of Materials Processing Technology*, nº 101, 2000, p. 137-145.
- MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte, In: Congresso Usinagem 2000, São Paulo – SP, 2000.
- MALKIN, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, 1ª edição, Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.
- MAMALIS A. G.; KUNDRAK J., GYANI K.; HORVATH M.; On the Precision Grinding of Advanced Ceramics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. (2002) 20:255–258
- MARINESCU, I.; TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. Handbook of Ceramic Grinding and Polishing, New Jersey. Noyes Publications, Cap.2, 1998.
- MARINESCU, I; ROWE, W.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. Tribology of abrasive machining process, NY, William Andrew Publishing, 2004.
- MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. Handbook of Machining with Grinding Wheels 1.ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- MATHEUS GOLÇALES PEREIRA; JOSÉ FERNANDES DA SILVA NETO; LUIZ GUSTAVO GUERMANDI; PAULO ROBERTO DE AGUIAR; ANSELMO EDUARDO; EDUARDO CARLOS BIANCHI. Utilização de jatos de ar comprimido para otimizar a técnica da mínima quantidade de lubrificante na retificação de materiais cerâmicos. In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011, Caxias do Sul-RS. v. CD-ROM. p. 1-11

- MAYER, J. E.; FANG G. P. Diamond grinding of silicon nitride ceramic. *Machining of advanced ceramics Conf. NIST*, p. 171-183, 1995.
- MOERLIN, A.W., MAESH, E.R.; *In-process force measurement for diameter control in precision cylindrical grinding*, Springer-Verlag London Limited 2008.
- NGUYEN, T.A.; BUTLER, D.L. Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.45, p.1321–1328, 2003.
- NOVASKI, O., DÖRR, J. Usinagem sem refrigeração. *Revista Máquinas e Metais*, Ano XXXV, nº 398, p. 18-27, março, 1999.
- OBIKAWA, T., TAKEMURA, Y., AKIYAMA, Y., SHINOZUKA, J., SASAHARA, H.; Microscopic phase-dependent residual stresses in the machined surface layer of two-phase alloy, *Journal of Materials Processing Technology* (2009).
- OLIVEIRA, J. F. G. Tópicos Avançados sobre o Processo de Retificação., EESC, USP, São Carlos, Publicação 048/89, 2001
- PAWLAK, Z.; KLAMECKI, E.B.; RAUCKYTE, T.; SHPENKPV, P.G.; KOKOWSKI, A. The Tribochemical and Micellar Aspects of Cutting Fluids. *Tribology International*, 38, 1, 2004.
- PAWLAK, Z.; KLAMECKI, E.B.; RAUCKYTE, T.; SHPENKPV, P.G.; KOKOWSKI, RAMESH K.; YEO S. H.; GOWRI S.; ZHOUL L.; Experimental Evaluation of Super High Speed Grinding of Advanced Ceramics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2001) 17:87–92.
- RAMESH, K.; HUANG, H. The Effects of Grinding Wheel Speed on Burr Creation and Surface Quality, *Machining Technology Group*, Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapore, 2003.
- RAVINDRA, H.V., SRINIVASA, Y.G., KRISHNAMURTHY, R.; Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. *Wear* 212 (1997) 78-84.
- RICE, R.W. *Mechanical properties of ceramics and composites*. New York. Marcelo Dekker Inc., 2000.
- RUNGE, P. R. F., DUARTE, G. N. *Lubrificantes nas indústrias – produção, manutenção e controle*. Cotia, SP, Brasil, Triboconcept Edições Técnicas, 1990, p. 71- 171.
- SAHM, D., SCHNEIDER, T., The production without coolant is interesting and must be more known, *Machines and Metals Magazine* (367) (1996) 38–55.
- SALMON, S. C. *Modern Grinding Process Technology*. McGraw-Hill, 1992.

SANCHEZ, J.A.; POMBO, I.; ALBERDI, R.; IZQUIERDO, B.; ORTEGA, N.; PLAZA, S.; MARTINEZTOLEDANO, J. Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology. *Journal of Cleaner Production* 18, p. 1840 – 1849, 2010.

SHAW, M. C. Principles of abrasives processing. Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 1996, 574 p.

SHILLOR, M., BABER, G.C, JEN, T., WI, M.; Thermal Analysis of the Grinding Process, *Mathematical and Computer Modelling* 39 (2004) 991-1003.

SOARES, D. D. e OLIVEIRA, J. F. G. Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais. *Revista Máquina & Metais*, nº 436, p.140 – 157, Maio, 2002.

SOKOVIC M., MIJANOVIC K., Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes, *Journal of Materials Processing Technology* 109 (2001) 181-189.

STANFORD, M.; LISTER, P. M.; KIBBLE, K. A., MORGAN, C. Investigation into the use of gaseous and liquid nitrogen as a cutting fluid when turning BS 970-80A15 (En32b) plain carbon steel using WC-Co uncoated tooling, *Journal of Materials Processing Technology* (Elsevier) 2007.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.J.; SADEGHI. Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication–MQL grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.50, p. 521–531, 2010.

TAWAKOLI, T.; WESTKAEMPER, E.; RABIEY, M. Dry grinding by special conditioning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 33, p. 419–424, 2007.

TONSHOFF, H.K.; LIERSE, T.; INASAKI, I., Grinding of advanced ceramics. In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. *Machining of Ceramics and Composites*, Marcel Dekker, Cap.3, 1999.

TONSHOFF, H.K.; MEYER, T.; WOBKER, H.G. “Machining Advanced Ceramics with Speed Stroke Grinding” *Ceramic Industry*, p.17-21, July 1996. *Tribochemical and Micellar Aspects of Cutting Fluids*. *Tribology International*, 38, 1, 2004.

VIEIRA JÚNIOR, M.; LIBARDI, R.; CANCELIERI, H. A.; LIMA, A. Como o calor pode afetar a integridade superficial das peças. *Revista Máquina & Metais*, nº 397, p.28-36, Fevereiro, 1999.

WANG, Z., WILLET, P., DEAGUIAR, P.R., WEBSTER, J.; Neural network detection of grinding burn from acoustic Emission, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001) 283–309.

WEBSTER, J. A. Selection coolant type and application technique in grinding Supergrind, University of Connecticut, p . 205-220, USA, 1995.

WEBSTER, J., DONG, W.P., LINDSAY, R.; Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process, Annals of the CIRP Vol. 45/7/7996,1996.

WECK, M.; HENNES, N.; SCHULZ, A. Dynamic Behavior of Cylindrical Traverse Grinding Processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology. V.50, p. 213-216, 2001.

WEINERT, K.; INASAKI, I.; SUTHERLAND, J.W.; WACABAYASHI, T. Dry machining and minimum quantity lubrication, CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 53,p. 511–537, 2004